

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2018**

**Bc. Martin Kryl**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského**  
**inženýrství**

**Vývoj experimentálního pracoviště pro optickou  
kontrolu slévárenských forem a vložených  
distančních prvků**  
**Development of an Experimental Workplace for  
Optical Control of Foundry Molds and Inserted  
Spacer Elements**

**2018**

**Bc. Martin Kryl**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Kryl**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy  
Téma: **Vývoj experimentálního pracoviště pro optickou kontrolu slévárenských forem a vložených distančních prvků**  
**Development of an Experimental Workplace for Optical Control of Foundry Molds and Inserted Spacer Elements**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Náplní práce je analýza, návrh a realizace systému pro kontrolu (jakosti povrchu) slévárenských forem v jednotlivých fázích jejich přípravy pro odlévání a dále pro kontrolu přítomnosti distančních podložek. Výsledkem práce by mělo být ověření, zda je aktivní triangulační metoda skenování vhodná pro nasazení v dané aplikaci.

### Body zadání:

1. Analýza pracovního prostředí a formulace požadavků.
2. Výběr vhodných HW komponent.
3. Blokový návrh systému s definicí funkcionality.
4. Návrh a implementace kontrolního a ovládacího SW včetně grafického uživatelského prostředí pomocí vývojového prostředí LabVIEW.
5. Odzkoušení funkce a spolehlivosti systému.
6. Zhodnocení výsledků.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění, část 1: Základní principy a hardware*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-8074941566.
- [2] HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění, část 2: Základy zpracování obrazu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-202-0.
- [3] SONKA, M., V. HLAVAC a R. BOYLE. *Image processing, Analysis and Machine Vision*. 4th edition. Toronto: CL Engineering, 2014. ISBN 978-1133593607.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



---

doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*




---

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
*děkan fakulty*

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 30.4.2018

  
.....  
podpis studenta

### **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

Dne 30.4.2018

  
.....  
podpis zástupce

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph. D. za odbornou asistenci, svému kolegovi a supervizorovi Bc. Janu Šrámkovi za ochotný přístup a podnětné rady, svým kamarádům Ing. Martinu Drlíkovi a Ing. Adamovi Paprskovi za technickou asistenci a v neposlední řadě rodině za trpělivost a podporu.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá realizací pracoviště s kamerovou inspekci, přičemž cílem práce je zkoumání a aplikace metod pro zjištění přítomnosti, polohy vložených komponentů ve slévárenské formě a její kvality povrchu. V jednotlivých fázích je pozornost věnována popisu hardwarové části, návrhu softwarové části a jejich testování na vývojovém robotickém pracovišti. Program je tvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW, jenž poskytuje nástroje pro sběr dat a zpracování obrazu.

## **Klíčová slova**

LabVIEW, zpracování obrazu, laserová triangulace, strojové vidění

## **Abstract**

Diploma thesis is focused to design and realization of workplace which is based on camera inspection, particularly active triangulation method. Goal of thesis is research and application of methods for detection of presence and position of inserted parts in foundry molds and quality of its surface. In each phase is attention aimed to hardware description, software design and their testing on robotic workplace. Program is developed in graphical programming environment LabVIEW which provides tools for data acquisition and image processing.

## **Key words**

LabVIEW, Image processing, laser triangulation, machine vision.

# Seznam použitých symbolů

Symbol/Zkratka	Jednotky	Název
$f$	Hz	Frekvence
$t$	s	Čas
$I$	A	Proud
$R$	$\Omega$	Odpor
$U$	V	Napětí



## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
1D, 2D, 3D	jednodimenzionální, dvoudimenzionální, třidimenzionální
API	Application programming interface
CCD	Charge-Coupled Device
CMM	Coordinate Measuring Machine
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CMY	cyan, magenta, yellow
COG	Center Of Gravity
FFD	Fused Filament Deposit
FIFO	First In First Out
HMI	Human Machine Interface,
IP	Internet Protocol
LiDAR	Light Detection And Ranging
MAC	Media Access Control
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller
Profinet RT	Profinet Real Time
PWM	Pulse Width Modulation
RADAR	Radio Detection And Ranging
RGB	red, green, blue
SPI	Seriál Peripheral Interface
TOF	time of flight
USB	Universal Serial Bus
VI	Virtual Instrument

## Obsah

Obsah .....	10
1 Úvod .....	1
2 Popis pracoviště a úlohy .....	2
2.1 Seznam požadavků .....	5
3 Přehled dostupných technologií .....	6
3.1.1 Komerové systémy .....	6
3.1.2 Základní rozdělení kamerových systémů .....	6
3.1.3 Parametry plošných kamer .....	8
3.2 3D skenery .....	12
3.2.1 Základní rozdělení 3D skenerů .....	12
3.2.2 Aktivní triangulační metoda .....	13
4 Výběr vhodné sestavy a nastavení .....	15
4.1 Nastavení geometrie scény .....	15
4.2 Kamerový senzory .....	16
4.3 Volba rozlišení .....	16
4.4 Objektiv .....	19
4.5 Laser .....	19
5 Popis hardwaru a vývojového pracoviště .....	21
5.1 Manipulátor .....	21
5.2 PLC .....	21
5.3 Kamera 1 .....	22
5.4 Kamera 2 .....	23
5.5 Osobní počítač .....	24
5.6 Výkonový přepínač a omezovač .....	24
5.7 Osvětlení .....	30
5.8 Topologie hardwarové sestavy .....	31
6 Software .....	32
6.1 Labview .....	32
6.2 Arduino .....	33
6.3 Struktura programu .....	34
6.4 Komunikace s Robotem/PLC .....	36
6.4.1 Popis softwarové realizace komunikace .....	36

6.5	Komunikace mezi PC a výkonovým přepínačem .....	38
6.5.1	Program v LabVIEW .....	38
6.5.2	Program v Arduinu.....	39
6.6	Nastavení - kamera 1 .....	42
6.7	Horizontální kalibrace - Kamera 1 .....	44
6.7.1	Kalibrační vzor .....	44
6.7.2	Kalibrační sekvence .....	45
6.8	Nastavení souřadnicového systému.....	48
6.9	Rozpoznání tvaru podložek pomocí konvenčních metod strojového vidění.....	51
6.9.1	Identifikace kvádrovitých podložek .....	52
6.9.2	Identifikace válcovitých podložek.....	55
6.10	Algoritmus pro vyhodnocení profilu aktivní triangulační metodou – Kamera 1 .....	56
6.11	Vytvoření výškové mapy – Kamera 1 .....	60
6.12	Vyhodnocení výškové mapy .....	62
6.12.1	Vyhodnocení výškové mapy za účelem měření rozměrů kvádrovitých podložek .....	63
6.12.2	Vyhodnocení výškové mapy za účelem měření rozměrů válcovitých podložek.....	64
6.13	Měření – Kamera 2.....	66
6.13.1	Výpočet parametrů .....	66
6.13.2	Nastavení kamery .....	67
6.13.3	Program pro sběr dat .....	67
7	Testování a vyhodnocení metod.....	68
7.1	Testování algoritmu pro nalezení podložek pomocí konvenčních metod .....	69
7.2	Testování algoritmu pro určení výšky podložek pomocí aktivní triangulační metody. ....	70
7.3	Testování algoritmu pro nalezení podložky ve výškové mapě .....	72
7.4	Testy – kamera 2 .....	76
7.5	Testování časové náročnosti jednotlivých algoritmů .....	78
8	Závěr .....	79

## Seznam ilustrací

Obr. 1 Pohled na výrobní linku zákazníka .....	2
Obr. 2 Distanční podložky .....	3
Obr. 3 Filtry.....	4
Obr. 4 Pohled na jádro formy s detailem jeho ucpávky .....	4
Obr. 5 Pohled na zkušební formu .....	5
Obr. 6 Přehled vlnových délek [4] .....	6
Obr. 7 Základní rozdělení kamer.....	7
Obr. 8 Rozdíl v architektuře CCD a CMOS snímačů [2].....	9
Obr. 9 Kruhové zobrazení barevného spektra .....	10
Obr. 10 Bayerova maska, CMY model a liniové RGB uspořádání.....	10
Obr. 11 Zakladní rozdělení prostorových skenerů .....	12
Obr. 12 Geometrie laserové triangulace.....	13
Obr. 13 Možná nastavení triangulačního trojúhelníku 1) Běžné 2) Inverzní Běžné 3) Zrcadlové 4) Nepřímé .....	15
Obr. 14 Model pro výpočet vertikálního rozlišení .....	17
Obr. 15 Model zobrazující pixel, pokrývající nejvzdálenější plochu .....	18
Obr. 16 Geometrie doplňující výše uvedený vzorec .....	19
Obr. 17 Varovné označení prostoru, vymezujícího pracoviště s laserem třídy 3R .....	20
Obr. 18 Pohled robota IRB 4600 a jeho řídicí jednotku IRC5 [14] .....	21
Obr. 19 Pohled PLC značky Bernecker & Reiner [15] .....	21
Obr. 20 Pohled na webkameru Microsoft Lifecam [17] .....	22
Obr. 21 Pohled na průmyslovou 3D kameru Automation Technology [16] .....	23
Obr. 22 Pohled na osobní počítač Acer Travelmate 5760g [18] .....	24
Obr. 23 Pohled na přepínač a omezovač výkonu světla.....	24
Obr. 24 Blokové schéma výkonového omezovače .....	25
Obr. 25 Arduino Nano připojené na ethernetový modul .....	25
Obr. 27 Zapojení PWM pinů v řídicí sekci .....	26
Obr. 28 Zapojení výkonové sekce PWM modulu .....	27
Obr. 29 Návrh napěťového regulovatelného zdroje .....	28
Obr. 30 Rozmístění komponentů na desce plošného spoje výkonového omezovače .....	29
Obr. 31 LED panel .....	30
Obr. 32 Topologie sestavy .....	31

Obr. 33 Pohled na uživatelské rozhraní jazyka Labview .....	32
Obr. 34 Programovací prostředí Arduino.....	33
Obr. 35 Softwarová struktura, jednotlivé pod-části .....	34
Obr. 36 Vzor pro model producent/konzument.....	35
Obr. 37 Zjednodušená ukázka funkce semaforu .....	35
Obr. 38 Diagram algoritmu pro komunikaci s robotem .....	36
Obr. 39 Zjednodušený kód pro komunikaci s PLC pomocí TCP/IP .....	36
Obr. 40 Indikátor stavu a přijatých dat z robota.....	37
Obr. 41 Úprava řetězce obdrženého z PLC .....	37
Obr. 42 Diagram algoritmu pro komunikaci s výkonovým omezovačem .....	38
Obr. 43 Indikátor stavu a nastavení výkonu pro výkonový omezovač .....	38
Obr. 44 Diagram algoritmu mikrokontroleru .....	39
Obr. 45 Obrazovka nastavení kamery .....	42
Obr. 46 Změna nastavení kamery v Labview.....	44
Obr. 47 Kalibrační vzor pro IMAQ. 1 – vzdálenost od středu ke středu, 2- Střed bodu, 3 – vzdálenost mezi kraji bodů.....	44
Obr. 48 Ukázka následků nesprávného návrhu kalibračního vzoru .....	45
Obr. 49 Diagram kalibrační sekvence .....	45
Obr. 50 Kalibrační sekvence v Labview .....	46
Obr. 51 Uživatelské rozhraní pro kalibraci snímku .....	46
Obr. 52 Grafické znázornění chyb způsobených zkreslením geometrie .....	47
Obr. 53 Uživatelské rozhraní pro kalibraci snímku .....	48
Obr. 54 Umístění souřadnicového počátku kamery při volbě Direct a Indirect.....	48
Obr. 55 Pořízený snímek a jeho kalibrovaný obraz při volbě Direct a Indirect.....	49
Obr. 56 Souřadnicový systém robota .....	50
Obr. 57 Funkce pro přepočet vzdálenosti od souřadnicového počátku.....	50
Obr. 58 Indikátor pro zobrazení dat pořízených z robota a přepočítané souřadnice.....	50
Obr. 59 Uživatelské rozhraní pro zpracování obrazu konvenční metodou .....	51
Obr. 60 Vliv zrcadlového a přímého nastavení geometrie na osvětlení kontaktní plochy podložky .....	51
Obr. 61 Vlevo fotografie měřené scény při inspekci kvádřovité podložky, vpravo pohled kamery s rozlišením 800x600 pixelů .....	52
Obr. 62 Kalibrovaná oblast zájmu s nalezenou kvádřovitou podložkou. Vpravo je zobrazen detail na pravý dolní roh podložky. ....	53
Obr. 63 Hranový bodový detektor.....	53

Obr. 64 Znázornění vazeb vedoucích k výpočtu stran podložek a určení jejich těžiště.....	54
Obr. 65 Vlevo fotografie měřené scény při inspekci válcovité podložky, vpravo pohled kamery s rozlišením 800x600 pixelů .....	55
Obr. 66 Kalibrovaná oblast zájmu s nalezenou kvádrovitou podložkou.....	55
Obr. 67 Uživatelské rozhraní pro zpracování obrazu pomocí aktivní triangulační metody.....	56
Obr. 68 Vlevo fotografie měřené scény při testu funkce algoritmů hledajících laserovou stopu, vpravo pohled kamery s rozlišením 800x600 pixelů.....	56
Obr. 69 Ukázky špatného a správného nastavení prahu pro hledání laserové stopy.....	58
Obr. 70 Kalibrovaná oblast zájmu s demonstrací výpočtu výšky předmětu .....	59
Obr. 71 Uživatelské rozhraní pro vytvoření výškové mapy.....	60
Obr. 72 Fotografie měřené scény se znázorněnou trajektorií pohybu robota.....	60
Obr. 73 Algoritmus jednotlivých úkonů při kontinuálním sběru dat pro pořízení výškové mapy .....	61
Obr. 74 Zjednodušený kód pro přepočet výškové mapy .....	61
Obr. 75 Jednotlivé kroky úpravy výškové mapy.....	62
Obr. 76 Výšková mapa sloužící k popisu algoritmu pro hledání válcovitých a kvádrovitých podložek .....	62
Obr. 77 Sekvence pro zpracování výškové mapy za účelem měření délky stran kvádrovité podložky.....	63
Obr. 78 Ukázka nefiltrovaného obrazu, obrazu s aplikovaným filtrem o velikosti 2x2 a obrazu s aplikovaným filtrem o velikosti 10x10 .....	63
Obr. 79 Ukázka volby ideálního prahu pro eliminaci podkladu .....	63
Obr. 80 Před a po odstranění podkladu .....	64
Obr. 81 Výsledný zpracovaný obraz se zobrazenými průsečíky, značícími rohy podložky .....	64
Obr. 82 Sekvence pro zpracování výškové mapy za účelem měření průměru válcovité podložky .....	64
Obr. 83 Ukázka ideální volby prahu .....	65
Obr. 84 Výsledný zpracovaný obraz s červeně vyznačenou podložkou. ....	65
Obr. 85 Nastavení geometrie během měření s kamerou Automation Technology C5.....	66
Obr. 86. Algoritmus pro kontinuálním sběr dat z kamery 2.....	67
Obr. 87. Distanční podložky .....	68
Obr. 88. Nastavení scény pro měření rozměrů distančních prvků .....	69
Obr. 89. Nastavení scény pro měření výšky distančních prvků .....	71
Obr. 90 Zvýrazněné části formy, ve kterých proběhlo měření výškové mapy.....	72
Obr. 91 Ukázka filtrace výškové mapy pomocí filtru o velikosti 4x4 .....	76
Obr. 92 Ukázka zpracování výškové mapy.....	76
Obr. 93 Zkreslení u hran podložek.....	77

## Seznam tabulek

Tab. 1 Rozměry distančních podložek .....	3
Tab. 2 Rozměry filtrů .....	4
Tab. 3 Frekventovaně používané plošné rozlišení snímačů .....	9
Tab. 4 Porovnání nejčastěji používaných komunikačních rozhraní [13] .....	11
Tab. 5 Parametry kamery Microsoft Lifecam .....	22
Tab. 6 Parametry kamery Automation Technology C5 .....	23
Tab. 7 Parametry PC Acer Travelmate 5760g .....	24
Tab. 8 Rozklad zprávy z PLC na jednotlivé členy .....	37
Tab. 9 Příklady zpráv odeslaných do výkonového omezovače .....	38
Tab. 10 Výčet možných stavů a následných reakcí LED indikátoru .....	40
Tab. 11 Přehled základních frekvencí a děličů na jednotlivých PWM pinech .....	41
Tab. 12 Zabarvení lokálních hranových detektorů pro různé směry hledání hrany .....	54
Tab. 13 Aplikovatelné algoritmy pro nalezení laserové stopy .....	57
Tabulka 13. Rozměry distančních podložek .....	68
Tabulka 14. Nastavení kamery a výsledky kalibrace pro měření rozměrů distančních prvků .....	69
Tabulka 15. Srovnání naměřených a skutečných délek a průměrů kontaktních ploch kvádrů a válců ..	70
Tabulka 16. Nastavení kamery a kalibrace pro měření výšky distančních prvků .....	71
Tabulka 17. Srovnání naměřených a skutečných výšek obou typů podložek .....	71
Tabulka 18. Nastavení kamery pro měření výškové mapy .....	72
Tabulka 19. Výsledky měření z první uvedené pozice formy .....	73
Tabulka 20. Výsledky měření z druhé uvedené pozice formy .....	74
Tabulka 21. Výsledky měření z třetí uvedené pozice formy .....	75
Tabulka 22. Test doby kalibrace pro různé rozlišení kamer .....	78
Tabulka 23. Doba zpracování algoritmů pro různé rozlišení oblasti zájmu .....	78

# 1 Úvod

Podkladem pro diplomovou práci je projekt realizovaný ve firmě Ingeteam a.s. a který byl primárně určený pro nasazení v průmyslovém prostředí. Celá studie je sice zhotovena na základě reálných požadavků zákazníka, ale jejím cílem je i uplatnění při řešení budoucích projektů.

Většina úkonů v průmyslových výrobnách je v sériové výrobě prováděna opakovaně a v dobách před rozmachem automatizace tyto úkony plnil primárně člověk, který je stále v některých ohledech nenahraditelný, leč v určitých ohledech limitovaný. Příkladnými omezeními mohou být pracovní rychlost, doba pracovního nasazení, nemožnost práce v rizikovém prostředí a možná ztráta koncentrace směřující k chybovosti v procesu. A právě poslední zmíněný faktor vede k nečekaným finančním ztrátám, motivujícím zákazníka k instalaci kamerové inspekce na některé části výrobních procesů.

Strojové vidění (machine vision) se obecně kvůli vzrůstajícím nárokům na kvalitu a stopovatelnost produktů stává jednou z klíčových technologií v průmyslové výrobě. Většinově je spjaté se stroji a automatizovanými řešeními, které vykonávají inspekci kvality za účelem eliminace vadných kusů, nebo k navádění různých typů robotů. Oba případy se týkají řešení v diplomové práci.

V úvodních kapitolách diplomové práce bude uveden rozbor pracoviště a požadavky zákazníka, pokračující výčtem dostupných a použitelných technologií. Poté je popsán postup výběru vhodného hardwaru, který je doprovázen seznamem použitého hardwaru se znázorněním topologie soustavy.

Další část je věnována popisu softwarového modelu, jehož části jsou následně detailně popsány.

V závěrečné kapitole jsou uvedeny výsledky a vyhodnocení testů.

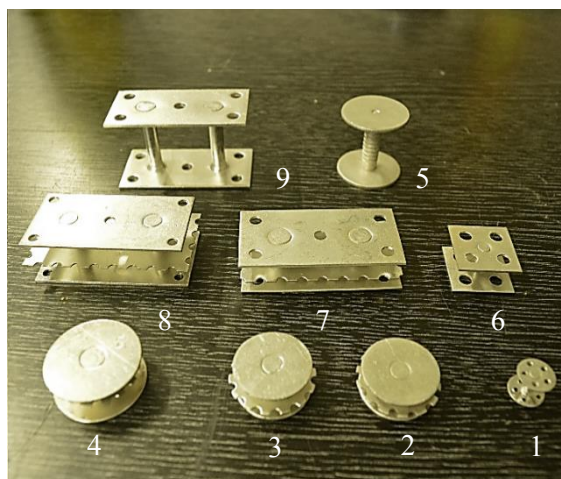


## 2 Popis pracoviště a úlohy



*Obr. 1 Pohled na výrobní linku zákazníka*

Výrobní linka zákazníka slouží pro výrobu metalických komponentů funkčních mechanických bloků zemědělských strojů a objektem automatizace se stává ta část, kde se před odlitím výrobku forma kompletuje. Ta se skládá ze tří částí. Ze spodního dílu, z jádra (umístěno uvnitř formy) a z horního dílu. Z technologického hlediska je zapotřebí, aby jádro neleželo na dně formy, ale aby bylo nadstaveno o definovanou výšku, k čemuž slouží distanční podložky mající kruhové, čtvercové či obdélníkové kontaktní plochy. Výška podložek je různorodá, ale v extrémním případě výškový rozdíl není menší než 2 mm. Podložky jsou v první fázi umístěny do předpřipravených pozic, přičemž v některých místech formy je vymezující prostor určen mírným snížením dna, nebo srovnáním strany formy takovým způsobem, aby podložka stála kolmo, či pouze pod mírným sklonem vůči základům formy. Největší zmetkovitost procesu bývá způsobena nesprávným výběrem výšky podložky, nebo jejím nepřesným uložením, a proto se diplomová práce věnuje majoritně řešení této problematiky.

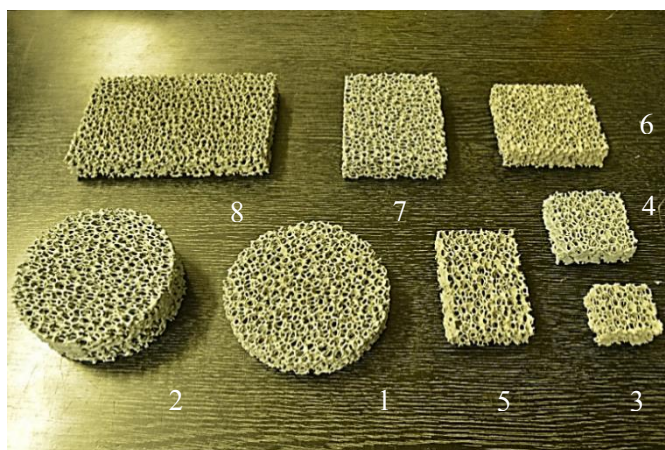


*Obr. 2 Distanční podložky*

*Tab. 1 Rozměry distančních podložek*

Podložky			
Válce	Průměr	Výška	
1	10	8	
2	20	8	
3	20	10	
4	25	10	
5	25	26	
Kvádry	Šířka	Délka	Výška
6	20	20	10
7	25	50	12
8	25	50	16
9	25	50	28

Po dosazení jader jsou do formy vloženy filtry, sloužící k odstranění nečistot ze slitiny během vlévání do formy a jsou vkládány do postranních otvorů. Tvary filtrů odpovídají válcům a kvádrům. Jejich rysem je charakteristický členitý povrch a šedá barva.

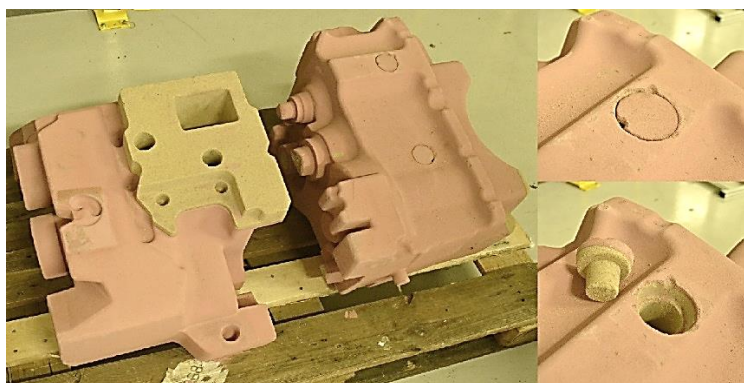


*Obr. 3 Filtry*

*Tab. 2 Rozměry filtrů*

Filtry			
Válce	Průměr	Výška	
1	100	25	
2	100	35	
Kvádry	Šířka	Délka	Výška
3	35	35	15
4	49	49	21
5	75	49	20
6	74	74	21
7	73	97	21
8	97	149	21

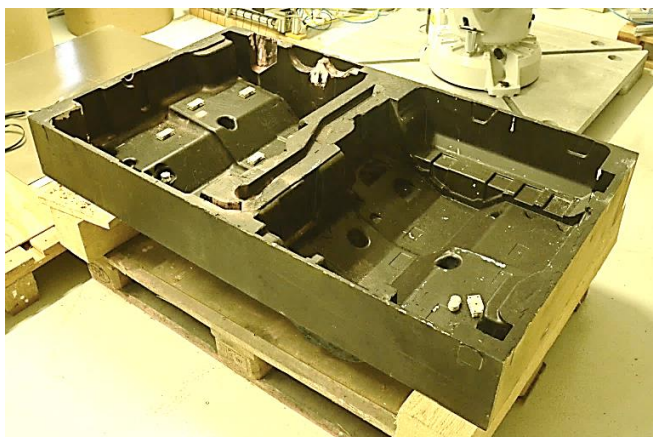
Posledním vkládaným materiálem jsou ucpávky jader, které materiálem i barvou korespondují s jádrem. V případě filtrů a ucpávek se řešila pouze jejich prezence.



*Obr. 4 Pohled na jádro formy s detailem jeho ucpávky*

Modely všech používaných forem s kusovníky nebyly zákazníkem sdíleny kvůli ochraně firemního know-how. Pro testovací účely byla vypůjčena zkušební forma, jádro, podložky i filtry s tím,

že forma sice není vyrobena z originálního materiálu, ale její profil, povrchová úprava i barva výplně se shodují s reálnými formami. V diplomové práci se bude počítat s rozměry sdíleného modelu, jehož parametry jsou délka x šířka x výška x maximální hloubka, 133cm x 79cm x 25 x 30cm.



*Obr. 5 Pohled na zkušební formu*

## **2.1 Seznam požadavků**

V následujících bodech jsou sečteny požadavky na systém, které by měly být při jeho návrhu dodrženy. Požadavky vznikly na základě logického uvážení po prezentaci aktuálního stavu a funkce pracoviště. Jejich exaktní formulace ovšem nebyla zákazníkem specifikována.

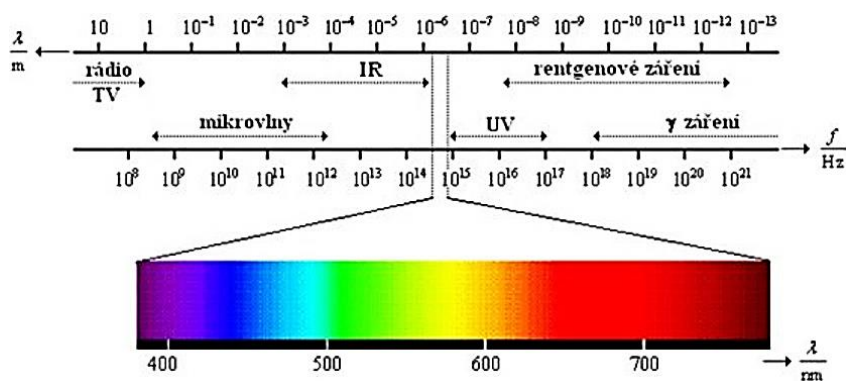
- Maximální doba měření, analýzy a vyhodnocení jedné formy je 60 s (odvíjí se od rychlosti pohybu linky).
- Přesnost měření ve všech osách 1 mm.
- Komunikace mezi jednotlivými zařízení v síti pomocí průmyslového ethernetu.
- Řídicí systém automatizované linky stavěný na PLC.
- Kooperace s robotickým manipulátorem.
- Zobrazení výsledků testu.

## 3 Přehled dostupných technologií

Na trhu jsou dostupné různé technologie pro řešení daného problému a v této kapitole jsou zmíněny ty, které by mohli být použity.

### 3.1.1 Kamerové systémy

Jedná se o zařízení s maticí či řadou snímacích elementů (pixelů), které jsou citlivé na intenzitu záření, a to v různých vlnových délkách. Niže uvedený obrázek č. 6 uvádí vlnové délky pro různá pásma, přičemž v praxi je možno se setkat se zařízeními reagujícími na odlišné rozsahy vlnových délek, vlastnostmi předurčující k nasazení v odlišných odvětvích. Těmi mohou být například medicínské přístroje operující v rozsahu rentgenového záření nebo naopak termovizní přístroje zobrazující teplotní mapu, pracující převážně v oblasti infračerveného záření. Strojové vidění je obor, který se většinou snaží napodobit vnímání lidského zraku, a proto se u naprosté většiny aplikací pracuje s viditelným spektrem o rozsahu vlnových délek 380 až 750 nm. Výjimkou může být snímání v blízkém infračerveném spektru (near infrared), které bývá snímáno stejnou technologií, ale je lidským zrakem nedetekovatelné, tehdy je uvažován rozsah vlnových délek 730 až 2500 nm. [2][3]



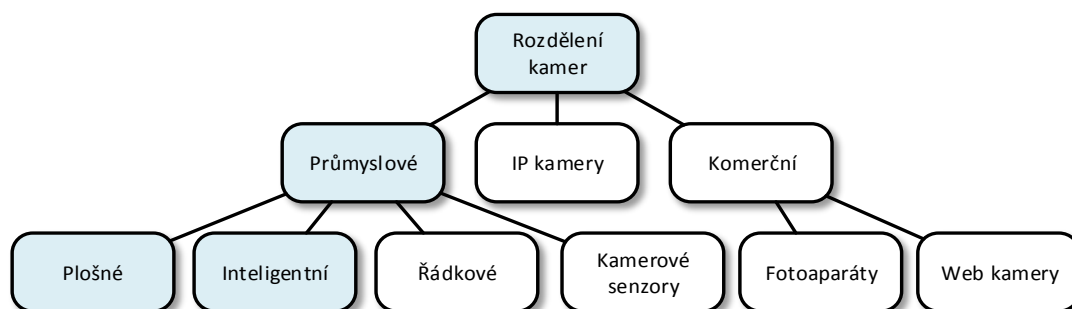
Obr. 6 Přehled vlnových délek [4]

### 3.1.2 Základní rozdělení kamerových systémů

Na obr. 7 je zobrazeno rozdělení kamer pracujících ve viditelném spektru. Modře označené jsou ty typy, které by mohly být zváženy pro aplikaci v diplomové práci.

Prvním analyzovaným typem jsou kamery komerční a jejich podskupinou jsou webkamery. Ty mohou být dostupné už od několika stovek korun. I přesto, že si mohou najít uplatnění při vývoji, jsou pro nasazení v průmyslovém prostředí krajně nevhodné kvůli nedostatečné odolnosti vůči vibracím a mechanickému namáhání. Snímky z webkamer také obsahují velké poměrné množství šumu, kompresi a většinou absenci nastavení jednotlivých parametrů.





*Obr. 7 Základní rozdělení kamer*

Druhým představitelem kategorie komerčních kamer jsou fotoaparáty. Jejich cena se pohybuje od několika tisíců korun za kompaktní modely až desítek tisíc korun za profesionální zrcadlové přístroje, jejichž kvalita snímků by byla pro účely strojového vidění dostatečná, ale jejich dálková obsluha je omezena pouze na uzavřené softwarové nástroje. Také i jejich konstrukční provedení není předurčené pro použití v průmyslovém prostředí.

Dalším odvětvím jsou IP kamery (internet protocol), které se vyrábí i pro nasazení v průmyslovém prostředí a které disponují možností dálkového ovládání. Jejich funkce je však primárně určena pro aplikaci v bezpečnostních systémech, kde kamera monitoruje hlídáný prostor. Její dražší varianty umožňují využití algoritmů pro rozpoznání pohybů osob a následnou nastavitelnou reakci (sepnutí logických výstupů, zaslaní sms apod.). IP kamery by pro některé aplikace strojového vidění dostačovaly, ale jejich nevýhodou je komprese snímku, jenž je nežádoucí při pořízení snímku za účelem odměřování rozměrů. [5]

Posledním zmíněným odvětvím jsou kamery průmyslové, jejichž cena se pohybuje od tisíců korun za modely levnější (Basler Ace acA1920-25gm) do statisíců korun za speciální kamery, obsahující elektroniku pro zpracování a vyhodnocení obrazu. Příkladem pak bude v diplomové práci použitá kamera Automation Technology C5-2040-GigE, která umožňuje funkce jako automatické hledání laserové stopy a její následné vyhodnocení.

První podskupinu průmyslových kamer tvoří takzvané inteligentní kamery. Jedná se o kameru v odolném provedení, obsahující elektroniku založenou na výkonných procesorech (může pracovat i v kombinaci s hradlovým polem). Celý koncept je myšlený tak, aby zpracování obrazu i jeho vyhodnocení bylo provedeno v kameře a ta pomocí výstupních portů a médií poskytovala výslednou informaci, jež může například být výsledek testu typu prošel/neprošel, kdy je měřena přítomnost kusů, odměřování rozměrů s definovanou tolerancí nebo textový řetězec s obsahem čárového kódu. Inteligentní kamery si nachází uplatnění zejména v automatizaci, v kombinaci s řídicími systémy. Příklady výrobců chytrých kamer jsou Datalogic, Sick, Cognex, Omron či National Instruments. V řešené úloze by si chytrá kamera uplatnění našla při inspekci polohy předmětů, ovšem model pro řešení laserové triangulace není k dispozici. [2]

Kamerové senzory je skupina kamer, připomínající svými vlastnostmi inteligentní kamery a nelze přesně určit kde je mezi nimi hranice. Obsahují elektroniku pro zpracování a vyhodnocení obrazu, ale jejich výstupem je pouze dvoustavová informace typu prošel/neprošel, ano/ne. Mohou disponovat integrovaným osvětlením a celková snaha výrobců vede k navržení systému, který nebude vyžadovat

hluboké znalosti v problematice nastavení scény a algoritmů pro zpracování obrazu. Základní znalosti ovšem potřebné jsou vždy. Hranice mezi chytrými kamerami a kamerovými senzory není pevně stavena. [2]

Druhým typem průmyslových kamer jsou kamery řádkové a jak jejich název napovídá, jejich funkce je založena na snímání pouze jedné řady pixelů. V praxi je možno se setkat i s řádkovými kamerami, které mají řad více. Například barevné kamery, kde může každý řádek prezentovat jednu barvu RGB nebo CMY modelu (celkem 3 řady), nebo s níže popsanou Bayerovou maskou (celkem 2 řady). Uplatnění řádkové kamery nacházejí v aplikacích s kontinuálním předem definovaným pohybem. V aplikaci je potřeba snímat rychlost pohybu takovým způsobem, aby se finální skládání celého snímku z jednotlivých řádků mohlo synchronizovat. Ukázkovou aplikací je měření jakosti povrchu při výrobě nekonečného plechu, nebo kontrola výrobků na pásového dopravníku. [2]

Posledním dostupným typem jsou plošné kamery, jejichž funkce spočívá pouze v pořízení snímku s tím, že výsledný obraz se vyhodnotí v externím zařízení. Plošné kamery poskytují nejširší škálu možných dostupných provedení s odlišnými parametry v kategorii, a také jsou v oblasti strojového vidění nasazeny nejčastěji. Výrobci plošných kamer je celá řada. Příkladem to jsou Cognex, Sick, Basler, Omron, Smartek, Xenics, Ximea, Falcon Eye, Sentechn, Jai, National Instruments a další. [2]

### **3.1.3 Parametry plošných kamer**

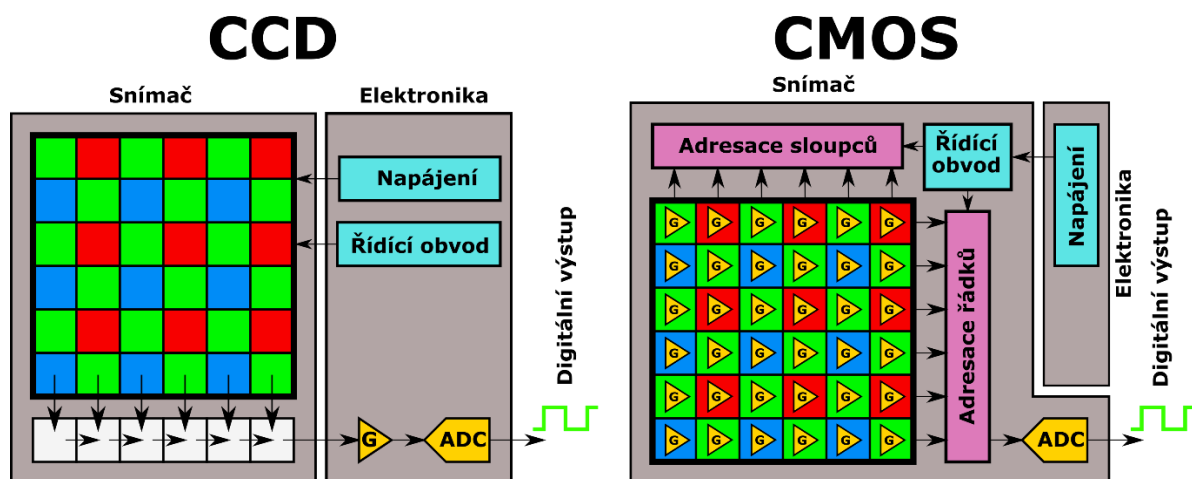
Sestavený inspekční systém je stavěn na plošné kamery a níže jsou popsány parametry, které jsou všeobecným vodítkem pro výběr jejího správného typu.

#### **3.1.3.1 Typ snímače**

Jak průmyslové, tak komerční kamery obsahují 2 základní typy senzorů.

Prvním je typ CCD, u kterého je každý pixel prezentován analogovým zařízením, které při absorpci dopadajících fotonů, podobně jako fotodiody, uvolňuje elektrony z nižších vrstev polovodičových materiálů ze základního do excitovaného stavu. Celý snímač pracuje jako posuvný registr a elektrony z jednotlivých buněk (pixelů) vyčítá a zesiluje postupně jeden po druhém z řádku, řádek po řádku, takže v jednom momentě se vždy vyčítají a zesilují uvolněné elektrony pouze z jedné buňky. Proces probíhá, dokud nejsou vyprázdněny všechny buňky snímače. Všeobecně jsou CCD snímače pomalejší, složitější na integraci (potřebují externí obvody zpracovávající výstupní signál), dražší a jejich energetická spotřeba je až 50krát větší než u typu CMOS, ale jejich přednostmi jsou dobrá citlivost, vysoký dynamický rozsah a nízký šum.

Podobně jako u CCD snímače, i základní funkce CMOS snímače využívá fotoefektu. Základní rozdíl ve funkci ovšem spočívá v tom, že každá buňka obsahuje svůj vlastní zesilovač a může být adresována a následně čtena nezávisle na ostatních. Oproti CCD senzorům jsou CMOS snímače menší, rychlejší a levnější. Jejich nevýhodou je menší dynamický rozsah a vyšší šum. [2]



Obr. 8 Rozdíl v architektuře CCD a CMOS snímačů [2]

### Rozlišení

Rozlišení displeje je všeobecně reprezentováno dvojím značením. První je udáváno v celkovém počtu pixelů, tedy například 1,3 Mpx a druhé v součinu počtu pixelů horizontálního a vertikálního rozlišení, příkladem 1280 x 1024. Celkový počet pixelů může být hrubě zaokrouhlen, takže je spolehlivější si v referenčním manuálu snímače vyhledat rozlišení v podání druhého zmíněného typu značení.

V obecném povědomí amatérských uživatelů komerčních fotoaparátů platí přímá úměra mezi kvantitou pixelů a kvalitou fotografie, což je ve strojovém vidění zavádějící. Kvalita je více ovlivněna velikostí čipu a s ní související velikostí fotocitlivé plochy jednoho pixelu. Tedy čím větší fotocitlivá plocha čipu, tím kvalitnější fotografie. Dále je také ovlivněna kvalitou objektivu a použitou technologií výroby senzoru. Ve srovnání s komerčními fotoaparáty je i cenový rozdíl v rozlišení u průmyslových kamer podstatně vyšší. [2]

Tab. 3 Frekventovaně používané plošné rozlišení snímačů

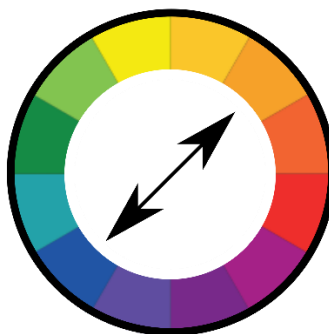
Označení	Počet pixelů	Rozlišení [Mpx]
VGA	640 x 480	0,31
WVGA	800 x 480	0,38
CCIR	720 x 576	0,41
SVGA	800 x 600	0,48
XGA	1024 x 768	0,79
SXGA	1280 x 1024	1,3
UXGA	1600 x 1200	1,9
HDTV	1920 x 1080	2,1
QXGA	2048 x 1536	3,1
QSYGA	2560 x 2048	5,2



## Barevné podání

Ve většině aplikací strojového vidění se používá monochromatická kamera s 8 bitovým rozlišením stupňů šedi. V případě potřeby odlišení předmětů s určitou barvou se před kameru nasazují filtry a výběr probíhá tak, že pokud je nutné zvýraznit předměty o dané barvě, například oranžové, před objektiv se instaluje filtr propouštějící světlo o vlnové délce prezentující oranžovou barvu, tedy 590 – 620 nm. [12]

V případě potřeby potlačení specifické barvy se vychází z kruhového zobrazení barevného spektra, jenž je znázorněno na obr. 9. Barva filtru je volena jako protichůdná barva. Například je-li nutné potlačit oranžovou barvu, je na objektiv instalován modrý filtr, tedy 450 – 495 nm. [12]

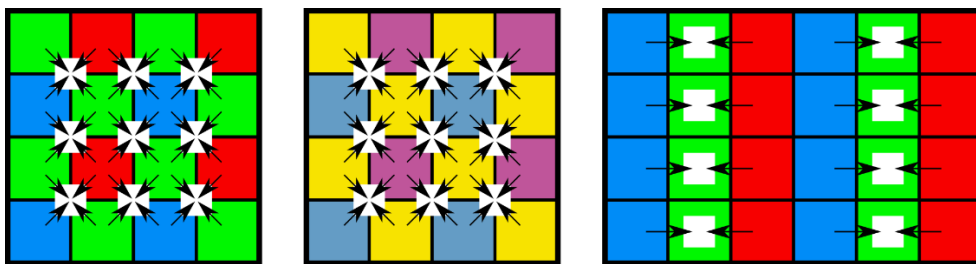


Obr. 9 Kruhové zobrazení barevného spektra

V aplikacích, kde je potřeba plné barevné podání existuje několik možností, jak barevnost snímku zaručit.

První možností je tříčipové uspořádání, jenž je založeno na rozkladu denního světla na elementární barevné složky červenou, zelenou a modrou soustavou hranolů s dichromatickými zrcadly. Každá z barevných složek je zvlášť snímána CCD čipem. Jedná se o jediné řešení, které nabízí přesné podání barev pro každý pixel, ovšem za vysokou cenu. Proto se používá pouze u náročných aplikací.

Druhou možností je využití několika modelů šachovnicového vzoru na jednočipovém uspořádání. Nejčastěji se používá RGB (červená, zelená, modrá) model, který se v níže zobrazeném uspořádání označuje jako Bayerova maska. Jedná se o aditivní model s dvojnásobnou citlivostí na zelenou barvu (lidské oko je více citlivé na zelenožlutou barvu). Výsledná barva se pak počítá interpolací z okolních pixelů. Alternativami mohou být subtraktivní CMY (azurová, purpurová, žlutá) model a méně používané liniové RGB uspořádání. [2]






Obr. 10 Bayerova maska, CMY model a liniové RGB uspořádání [2]

### 3.1.3.2 Komunikační rozhraní

Aktuálně je možno kamery připojit k výpočetní jednotce pomocí standardů USB 3, GigE, Camera Link, IEEE 1394 (Firewire), USB 2, LVDS z nichž poslední 3 jmenované jsou na ústupu a do nových návrhů se nezahrnují kvůli dostupnější alternativě v podobě USB 3 v případě IEEE 1394, nízké propustnosti a absenci univerzálního ovladače v případě USB 2 a kvůli dostupnosti modernějšího nástupce Camera Linku v případě LVDS. [13]

Tab. 4 Porovnání nejčastěji používaných komunikačních rozhraní [13]

Rozhraní	USB3	GigE	Camera Link
Konektor			
Šířka pásma	600 MB/s	120 MB/s	800 MB/s
Přenosová rychlost	5 Gb/s	1000 Mb/s	3,6 Gb/s
Maximální délka samotného kabelu	3 m	100 m	10 m
Zatížení procesoru výpočetní jednotky	nízké	střední	nízké
Maximální počet připojených kamer	až 127	Neomezeně	1
Cena	nízká	nízká	vysoká

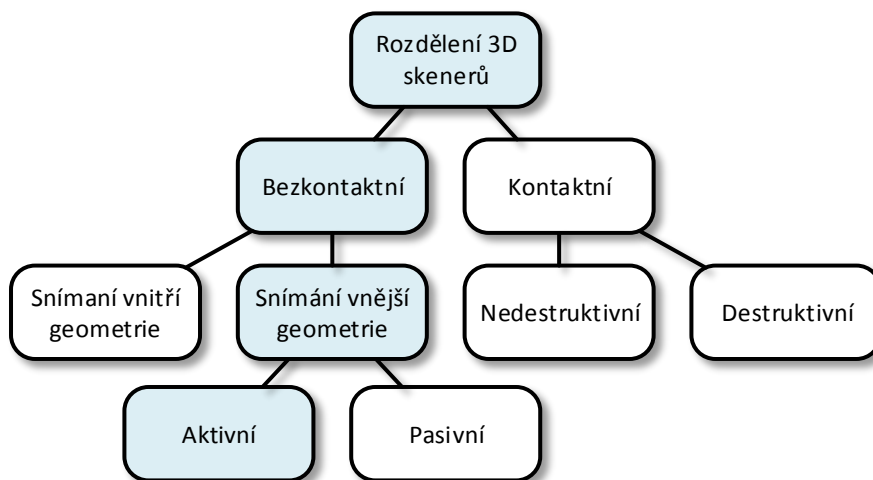
Veškeré hodnoty v tab. 4 jsou uvedeny v plné konfiguraci rozhraní.

První uvedené USB 3 disponuje velkou šířkou pásma, nízkou pořizovací cenou a zvětšující se podporou, jenž je doprovázena instalací rozhraní do nových počítačů. Dalším plusem je kompatibilita s USB3 Vision a GenICam, což jsou standardy umožňující vzájemné připojení kamer různých výrobců bez nutné změny ovladačů. Nevýhodou je krátká délka média, která může s pomocí zesilovačů nabývat až 30 m. GigE vision si uplatnění najde v projektech, které jsou založeny na Ethernetu, protože se po připojení do sítě kamera chová jako běžné síťové zařízení. Důvodem výběru rozhraní může také být i maximální možná délka samostatného kabelu činící 100 m, přičemž použity mohou být i jeho standardní typy Cat-5 a Cat-6. Obdobně jako u USB 3 i GigE nabízí standardizaci komunikačního protokolu, jenž je nazývána GigE Vision. Poslední zmíněný Camera Link je rozhraním s největší propustností ale i cenou, proto se používá zejména v náročných aplikacích při přenášení snímků z vysokorychlostních kamer, nebo kamer s velkým rozlišením snímků. [2][13]

## 3.2 3D skenery

Úkolem 3D skenerů je zachycení digitální informace o tvaru reálného objektu, případně i jeho barvy. Informace jsou dále zpracovány většinou tak, aby bylo možné z obdržených mračen bodů vytvořit rekonstruovaný prostorový model objektu. V případě měřicích úloh se pak mračna bodů zpracovávají a vyhodnocují za účelem extrakce žádoucích informací [6].

### 3.2.1 Základní rozdělení 3D skenerů



Obr. 11 Základní rozdělení prostorových skenerů

Na obr. 11 je zobrazeno základní rozdělení prostorových skenerů. Modře označený je skener, který byl sestaven a testován.

První skupinou jsou přístroje kontaktní, kde je pro měření nezbytné, aby se skener měřeného objektu dotýkal. V případě destruktivního skeneru objekt během měření zanikne. Tahle metoda se uplatňuje v reverzivním inženýrství pro vytvoření modelu, obsahujícího i vnitřní strukturu součástí. Celý princip je stavěn na postupném ubírání tenkých povrchových vrstev a následném skenování nově soustruženého povrchu bezkontaktní optickou metodou. V případě nedestruktivního skeneru se může jednat o odměřování souřadnicovými měřicími přístroji (CMM), nebo skenery s mechanickou paží. Obě skupiny umožňují jednobodové měření, kdy pozice měřicího hrotu je přepočítána z dat enkodérů jednotlivých kloubů ramena. Tato technologie měření se automatizuje jenom v případě, že je potřeba velmi přesné měření stěžejních bodů v určité geometrii. V případě mechanické paže, je polohování zajištěno ručně obsluhou. Výhoda metody spočívá v tom, že poskytuje přesné měření bez vlivu okolních světelných podmínek. Nevýhoda se projeví v případě skenování celého objektu, protože hrotem se musí postupně objet celý předmět. To je časově náročné [7].

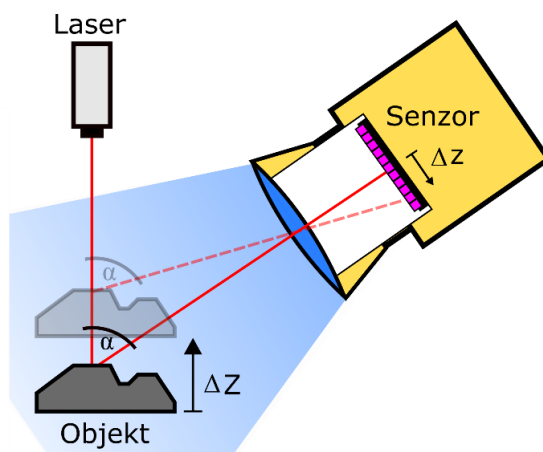
Skupina bezkontaktních skenerů zahrnuje představitelů více. První podskupina se týká skenerů snímajících vnitřní geometrie. Ta svojí funkcí odpovídá lékařské magnetické rezonanci, využívající natáčení os atomových jader ve směru buzeného magnetického pole. Metoda je vhodná pro kontrolu uzavřených nádob třeba i potrubí. Druhý typ je založen na počítačové tomografii, tedy rentgenovém záření. Opět funkce odpovídá lékařskému přístroji, diagnostickému rentgenu. [7]

Největší popularitě se těší skenery patřící do kategorie pro měření vnější struktury bezkontaktním způsobem. Podrobnější rozdělení skýtá pasivní a aktivní přístroje. Pasivní jsou ty zařízení, která nevyzařují do okolí žádnou energii, pouze přijímají. V podstatě pracují na pořízení několika snímků s různým natočením tělesa, nebo s odlišnou známou polohou snímače. Princip měření může spočívat na pohybu objektu, přibližování obrazu, získáváním tvaru ze stínu objektu, nebo využitím vícero kamer. Použitelnost metody se odvíjí od vlastností měřené scény, která by měla mít viditelné hrany, kontury, barvy povrchu a případně osvětlení zvolené tak, aby snímek obsahoval co nejméně sousedících pixelů a ploch se shodnou intenzitou. [7]

Aktivní senzory jsou posledním zmíněným typem. V základu se rozdělují podle typu vyzařovaných energií, a tedy na světlo, zvuk a všechna možná elektromagnetická záření. V principech je možno se setkat s LiDARy, jejichž funkce vychází z výpočtu času letu světla (TOF), u nichž je kvůli rychlosti záznamu doby reakce potřeba náročného hardwarového systému. Dalším zařízením je RADAR, jehož funkce je LiDARu podobná s tím rozdílem, že snímána je doba letu elektromagnetické vlny. Metodika snímání 2D obrazu RADARem se nazývá radar imaging (radarové zobrazování) a uplatňuje zejména v analýze vzdáleného terénu. V případě využití akustických vln je princip stavěný na době odrazu zvukové vlny od měřených objektů. Příkladem je lékařský ultrazvuk, který využívá odlišné akustické impedance jednotlivých orgánů, respektive přechodů tkání, vedoucí k rozdílné odrazivosti zvuku. Praktickým příkladem může být sonar, který se, kvůli nízkému pohlcení ultrazvuku v kapalinách, používá v námořních technologiích. [8]

Posledním zmíněnou oblastí aktivních 3D skenerů pro měření vnější geometrie jsou zdroje energie optické. Měřený objekt je nasvícen zdrojem světla s předem definovanými vlastnostmi, přičemž promítaný vzor může mít různou složitost. Od jednoduchého bodového laseru do projektořem promítaného složitějšího obrazce. Snímací elementem je kamera nebo více kamer a celý princip výpočtu vzdálenosti bodů vychází z triangulačního trojúhelníku. [9]

### 3.2.2 Aktivní triangulační metoda



Obr. 12 Geometrie laserové triangulace

Jméno metody vychází z anglického triangle, (v překladu trojúhelník), protože vzájemná geometrie laserového emitoru, vyzařovaného paprsku, odraženého paprsku a senzoru tvoří tento útvar (v literatuře označovaný triangulační trojúhelník).

Laserový paprsek je promítán na měřený objekt a od něho odražen přes čočku na maticový senzor (CCD, CMOS) kamery. S přibližujícím či oddalujícím se předmětem se mění i úhel odrazu paprsku a pozice jeho dopadu na senzor. Změnou úhlu kamery a emitoru lze měnit vertikální rozlišení. Nevýhodou metody je, že hrany v měřené scéně mohou stínit odražený paprsek, což v praxi lze částečně eliminovat použitím více kamer, či laserů.

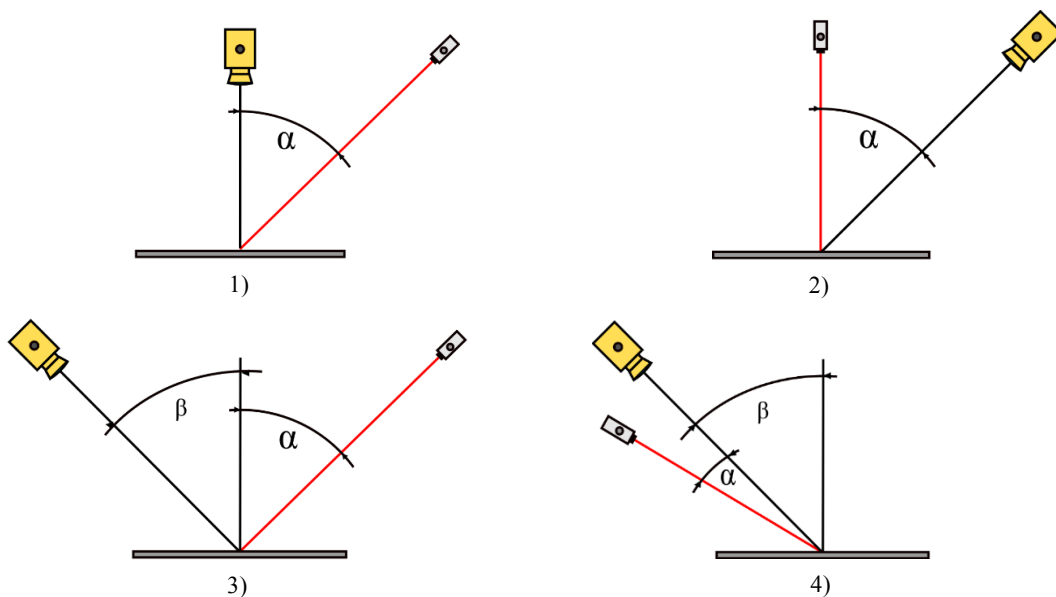
## 4 Výběr vhodné sestavy a nastavení

V téhle kapitole je uveden postup pro výběr optimálních komponentů měřicího systému.

Z výše uvedených zařízení, by se pro kontrolu formy mohlo nasadit několik typů systémů, stavěných na různých fyzikálních principech. Ideální by bylo takové zařízení, jehož výstupem by byl hotový 3D model, ovšem taková průmyslová zařízení jako například prostorový LiDAR Leica P-20 nebo prostorový triangulační skener ATOS III, se svoji cenou převyšující 100 000 \$, jsou finančně nedostupná. Z těch technologií patřících do cenové kategorie do 10 000 \$ zbývá LiDAR, aktivní triangulační metoda a stereografie. Stereografie je pro použití krajně nevhodná, protože dno formy má uniformní černou barvu a není kontrastní. Pro měření byla tedy zvolena aktivní triangulační metoda, protože nabízí vyšší přesnost a je realizovatelná i na nevykonném hardwaru.

### 4.1 Nastavení geometrie scény

V metodě laserové triangulace pomocí liniového laseru jsou k dispozici 4 možnosti pro nastavení geometrie triangulačního trojúhelníku. Každá z variant má své přednosti a zápory a žádné z nich není vždy tím ideálním, univerzálním. Výběr sestavy je také odvozen od charakteristiky objektu, žádaného výškového rozlišení a výkonu laseru.



Obr. 13 Možná nastavení triangulačního trojúhelníku 1) Běžné 2) Inverzní Běžné 3) Zrcadlové 4) Nepřímé

#### Běžné (Regular)

Ideální pro multi-skenovací režim s použitím několika laserových stop. Poskytuje nejvyšší rozlišení, a tedy i přesnost. Běžné nastavení ovšem může mít tendenci vést k nepřesnému snímání laserové stopy u difuzních povrchů. [9]

### **Inverzní běžné (Reverse ordinary)**

Jedná se o geometrii s nejjednodušší aplikací kalibračních algoritmů a nejmenší náchylností k mylnému odečtení stopy. Hloubkové rozlišení je mírně horší než u běžného nastavení. [9]

### **Zrcadlové (Specular)**

Nastavení je vhodné pro měření objektů s nízkou odrazivostí povrchu, tedy matných a tmavých. Obecně se vyžaduje menší množství odraženého světla. Uspořádání je také vhodné pro aplikaci, kde z bezpečnostních důvodů nemůže být použitý silný laser. Nevýhodou je, že se zvětšujícími se úhly  $\alpha$  a  $\beta$  se zvětšuje i náchylnost k mylnému vyhodnocení laserové linie a klesá výškové rozlišení. [9]

### **Nepřímé (Look away)**

Využívá nepřímý odraz světla a vyžaduje silnější zdroj světla než u předchozích případů. Geometrie je ze zmiňovaných nejvíce odolná vůči mylné analýze stopy, způsobené difuzním odrazem, a to za cenu nízkého rozlišení a větší okluze. [9]

Z výše uvedených metod lze uvažovat nad aplikací běžné geometrie v případě, že bude požadováno použití 2 laserů kvůli eliminaci slepých míst, způsobených zacloněním laseru hranou. Problém měřené scény je takový, že na černém povrchu s velkou pohltivostí jsou umístěny podložky s vysokou odrazivostí. To eliminuje použití zrcadlové geometrie. Naopak pohltivost tmavého povrchu formy eliminuje uplatnění nepřímé geometrie, kde by také byl zapotřebí laser vyšší třídy a následné zabezpečení celého pracoviště vůči možnému kontaktu laserového svazku s obsluhou. Kvůli rozdílnosti povrchů byla zvolena inverzní běžná geometrie slibující nejmenší náchylnost vůči mylnému odečtení stopy.

## **4.2 Kamerový senzory**

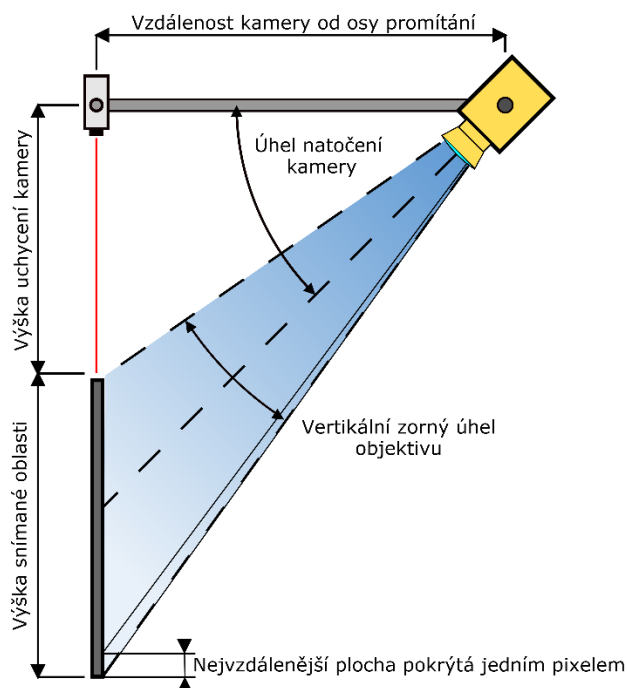
Při výběru kamerového senzoru je potřeba zohlednit všechny výše uvedené parametry uvedené v kapitole 1.1.3. Pro kvalitnější měření je lepší volit monochromatickou kameru s vhodným filtrem, jenž eliminuje zkreslení způsobené Bayerovou maskou a s co největším rozměrem čipu, který vede k zachycení většího množství fotonů. Tím se eventuálně může zkrátit expoziční čas a zrychlit měřicí proces.

## **4.3 Volba rozlišení**

Při výběru rozlišení se postupuje tak, aby byl dodržen Shannonův vzorkovací teorém, z jehož znění vyplývá, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát vyšší než nejvyšší zajímavá harmonická frekvence v signálu, jinak může dojít k aliasingu, neboli ke zkreslení nepřijatelně odlišujícímu původní signál od rekonstruovaného. V případě odměřování rozměrů kamerovým senzorem musí být podle teorému nejmenší zajímavý měřený detail pokryt minimálně dvěma pixely. Zkušební vývojáři ovšem uvádí, že v praxi je vhodnější použít čtyřikrát až pětkrát jemnější vzorkování. V případě úlohy, kdy je potřeba měřit s přesností jednoho milimetru v obou směrech by jeden pixel měl ideálně pokrývat maximálně délku 0,2 mm, jak v horizontálním, tak vertikálním směru. Dále je při

výběru rozlišení kamery vhodné brát v úvahu, aby senzor neměl zbytečně velké rozlišení, protože s narůstajícím rozlišením roste i počet hodnot, které je potřeba zpracovat, a to může vést k zdlouhavé analýze a vyhodnocení celého měření. Alternativou je snížení rozlišení softwarovým spojováním pixelů (pixel binning), kdy se výsledné rozlišení počítá průměrováním sousedních pixelů (kamery tuto funkci mohou mít i implementovanou), ale rozlišení zvolené na míru bude výhodnější, kvůli efektivnějšímu využití plochy čipu (bude mít větší fill-factor, tedy skutečnou plochu čipu, která je světlo citlivá). V případě výběru 3D kamery je vhodné před zakoupením nastudovat dostupné funkce hledání automatického hledání stopy. Ty totiž umožňují pomocí matematických metod vypočítat výšku profilu s pod-pixelovou přesností. Jinými slovy umožňují dosahovat přesnějšího měření, než je dáno teoretickým níže uvedeným výpočtem, ale to pouze ve směru měření výšky profilu. [2]

Na následujícím obr. 14 je zobrazena sestava pro následný výpočet rozlišení. Zde je třeba uvážit, že pokud by mělo být zachováno minimální rozlišení po celém měřeném rozsahu, musí se počítat s pokrytím té nejvzdálenější plochy, jenž je měřena jedním pixelem.

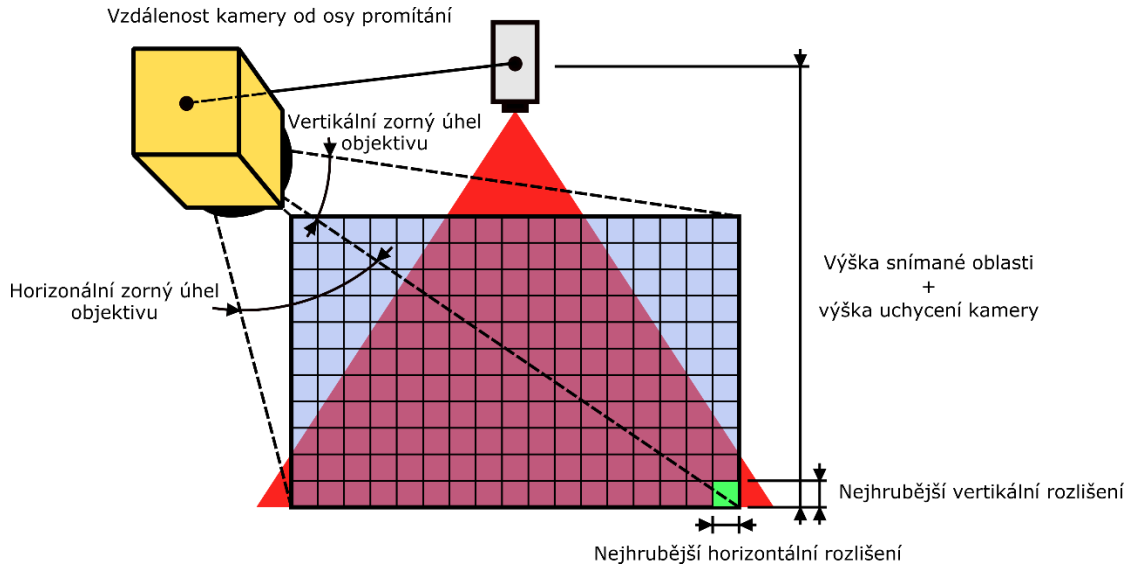


Obr. 14 Model pro výpočet vertikálního rozlišení

Výpočty jsou založeny na goniometrických funkcích a v základní geometrii ve středové ose kamery se vychází z následující rovnice.

$$\tan(\text{úhel natočení kamery } [^\circ] + \frac{1}{2} \cdot \text{zorný úhel objektivu } [^\circ]) = \frac{\text{výška uchycení kamery [m]} + \text{výška snímané oblasti [m]}}{\text{vzdálenost od osy promítání [m]}} \quad (1)$$





Obr. 15 Model zobrazující pixel, pokrývající nejvzdálenější plochu.

Následující rovnice slouží pro výpočet délky vertikálního a horizontálního nejhrubějšího délkového rozlišení na 1 pixel, přičemž se vychází z goniometrických funkcí a z geometrie zobrazené na obr. 14 a obr. 15.

$$HHR = \left( \tan\left(\frac{HZUO}{2}\right) \cdot \frac{VK + VSO}{\sin\left(UNK + \frac{VR}{2}\right)} \right) - \left( \tan\left(\frac{HZUO}{2} - \frac{HZUO}{2} \cdot \frac{VR}{HR}\right) \cdot \frac{VK + VSO}{\sin\left(UNK + \frac{VR}{2}\right)} \right) [m] \quad (2)$$

$$HVR = \left( \tan\left(UNK + \frac{VZUO}{2}\right) \cdot \frac{VKOP}{\sin\left(\frac{HZUO}{2}\right)} \right) - \left( \tan\left(UNK + \frac{VZUO}{2} - \frac{VZUO}{VR}\right) \cdot \frac{VKOP}{\sin\left(\frac{HZUO}{2}\right)} \right) [m] \quad (3)$$

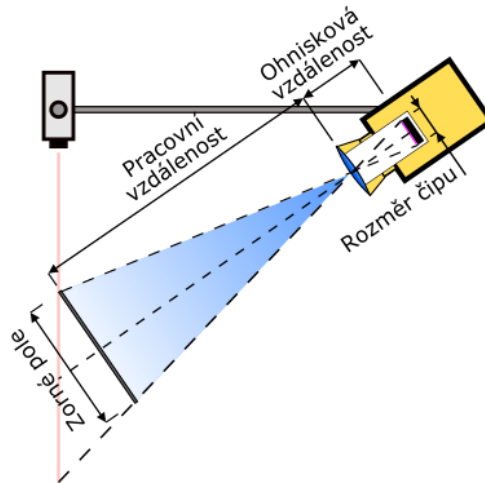
kde:

<b>HHR</b>	hrubé horizontální délkové rozlišení [m]
<b>HVR</b>	hrubé vertikální délkové rozlišení [m]
<b>HZUO</b>	horizontální zorný úhel objektivu [°]
<b>VZUO</b>	vertikální zorný úhel objektivu [°]
<b>HR</b>	horizontální rozlišení snímáče
<b>VR</b>	vertikální rozlišení snímáče
<b>VK</b>	výška kamery [m]
<b>VSO</b>	výška snímané oblasti [m]
<b>UNK</b>	úhel natočení kamery [°]
<b>VKOP</b>	vzdálenost kamery od osy promítání [m]

## 4.4 Objektiv

Při výběru vhodného objektivu, se vychází z plochy měřené scény, pracovní vzdálenosti, velikosti čipu senzoru a ohniskové vzdálenosti. Jednotlivé neznámé pak lze dopočítat z níže uvedeného vztahu.

$$\frac{\text{pracovní vzdálenost}_{[mm]}}{\text{zorné pole}_{[mm]}} = \frac{\text{ohnisková vzdálenost}_{[mm]}}{\text{rozměr čipu}_{[mm]}} \quad (3)$$



Obr. 16 Geometrie doplňující výše uvedený vzorec

Při návrhu se ovšem musí zohlednit fakt, že s rostoucí ohniskovou vzdáleností objektivu klesá hloubka ostrosti snímků a že objekty jsou více ostré za zaostřovací vzdáleností než před ní. Samotná hloubka ostrosti je také nepřímo úměrná clonovému číslu použité čočky. Celá problematika nastavení parametrů při fotografování je rozsáhlá a lze si ji nastudovat v odkázané referenci. [11]

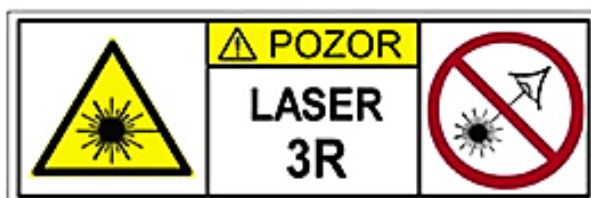
## 4.5 Laser

Při výběru a instalaci laserů je nutné zohlednit normu ČSN EN 60825-1 ed.3, zabývající se možnými riziky při kontaktu laseru s kůží a očima, a to pro laserové kategorie 1 – 4. Mezi očíslováním kategorie a výkonem laseru je přímá úměra a zatímco laser třídy 1 lze nasadit naprosto v každé aplikaci a to i v případě, že obsluha přímo sleduje svazek optickými pomůckami, u vyšších tříd už je nutno si jednotlivé podmínky nastudovat, protože například u třídy 4 může i nepřímý kontakt vést k trvalému zranění rohovky, popálení kůže, či zapálení hořlavin. V případě použití laserů vyšší kategorie jak 4 je obecně nutné zajistit pracoviště tak, aby za žádných okolností nebyl možný kontakt laseru s obsluhou. [10].

Při nasazení laseru v profilometrii je často stěžejním faktorem rychlost pořízení snímků. Snaha o zrychlení procesu vede ke krátkým expozičním časům, kdy je zapotřebí senzory kamer vystavit dostatečně intenzivnímu záření (počtu fotonů). To a také pohltivý tmavý povrch formy vede k potřebě volby silnějšího zdroje. Proto byl pro aplikaci zvolen nejsilnější možný bezpečný laser třídy 3R. Při práci s ním je potřeba pracoviště zajistit cedulí, varující obsluhu a kolemjdoucí pracovníky proti přímému pohledu do laserové svazku.

## Třída 3R

Jedná se o poslední třídu s nízkým rizikem poranění. Přímý pohled do laserového svazku může způsobit poranění rohovky, ale pravděpodobnost je relativně nízká. I tak by laserové zařízení třídy 3R měli nezakrytované nacházet jenom tam, kde je přímý pohled do svazku nepravděpodobný. [10]



*Obr. 17 Varovné označení prostoru, vymezujícího pracoviště s laserem třídy 3R*

## Filtr

Snímek pořízený monochromatickou kamerou zobrazuje součet všech fotonů, dopadajících na senzor, s vlnovou délkou v rozsahu daném filtrem typu pásmová propust, který je ve výrobním procesu nanesený na samotný čip. Mezní hranice filtru lze vyčíst z referenčním manuálu kamery nebo čipu. Většinou se pohybuje v rozsahu viditelného záření. Kvůli omezení vlivu parazitního osvětlení, je vhodné na objektiv kamery instalovat filtr propouštějící pouze ty vlnové délky, které nesou žádoucí informací. U aktivní triangulace se jedná o odraz laserového paprsku, jehož výhodnou vlastností je minimální rozptyl vlnové délky záření (jedná se o koherentní zdroj světla). Typ filtru se vybírá podle vlnové délky, uvedené v technickém listu, přičemž použitý laser vyzařoval svazek o vlnové délce 660 nm. V případě aktivní triangulační metody byl na objektiv kamery od Automation Technology instalován filtr značky Schneider Kreuznach typu horní propust, propouštějící záření s vlnovou délkou větší jak 600 nm, tedy barvy červené a blízké infračervené. Během používání kamery Microsoft Lifecam se při triangulaci pracovalo pouze s tou vrstvou reprezentující červenou složku v obraze, jenž byla interpolována z Bayerovy masky.

## 5 Popis hardwaru a vývojového pracoviště

### 5.1 Manipulátor

Jako prozatímní vývojová náhrada manipulátoru sloužil šestiosý robot od firmy ABB s typovým označením IRB 4600 a nosností 60 kg, který dokáže sekvenci pohybu zopakovat s přesností šest desetin milimetru. V aplikaci bylo využito pouze pohybu v osách X,Y,Z s tím, že v případě potřeby by bylo možné koncový kloub s kamerou natáčet ve všech ostatních potřebných osách. Robot byl řízen 3 fázovým kontrolérem s označením IRC5 single, sloužícím pro veškeré řízení a obsluhu robota. Jako HMI rozhraní je použit ovladač s označením FlexPendant, umožňující programovat robota, trasovat jeho dráhu a navádět ho v reálném čase pomocí integrovaného joysticku. Během testování byl využit pouze manuální mód.



*Obr. 18 Pohled robota IRB 4600 a jeho řídicí jednotku IRC5 [14]*

### 5.2 PLC

Součástí sestavy je i PLC značky Bernecker & Reiner s moduly X20 IF 10E1-1, X20 BC 1083 a X20 PS 9400. První zmiňovaný slouží pro komunikaci mezi PLC a řídicí jednotkou robota pomocí Profinetu RT, což je průmyslový standart založený na ethernetu, který je upravený pro potřeby aplikací v reálném čase, je tedy deterministický. Funkce druhého zmíněného modulu taktéž slouží pro komunikaci přes průmyslový standard založený na ethernetu, Powerlinku, vyvíjeným společností Bernecker & Reiner. Poslední zmiňovaný slot PLC slouží pro napájení sestavy.



*Obr. 19 Pohled PLC značky Bernecker & Reiner [15]*

## 5.3 Kamera 1

Pro snímání samotné stopy byly využity dva přístupy. V prvním přístupu bylo cílem minimalizovat cenu a navrhnout řešení, které by nemuselo být tím nejlepším, ale dostatečným. A aby bylo případně univerzálně a modulárně použitelné pro jakýkoliv typ vybrané plošné kamery. K samotné realizaci byla využita webkamera Microsoft Lifecam Studio, která by sice v průmyslovém prostředí svojí konstrukcí neobstála, ale pro vývoj samotné aplikace byla dostačující. Jako jedna z mála dostupných webkamer umožňuje manuální nastavení expozičního času i ostřicí roviny. Bohužel disponuje rolovací závěrkou, což v praxi znamená, že geometrie předmětů bude v případě snímku pořízeného v pohybu zkreslená. Dalším nežádoucím faktorem je nevyhnutelná komprese snímku a barevnost kamery zajištěná Bayerovou maskou, jenž ke zkreslení snímků také přispívá.



*Obr. 20 Pohled na webkameru Microsoft Lifecam [17]*

*Tab. 5 Parametry kamery Microsoft Lifecam*

<b>Rozlišení senzoru</b>	1920 x 1080
<b>Typ senzoru</b>	CMOS
<b>Manuální ostření</b>	0,1 - 10 m
<b>Bitová hloubka</b>	16 Bit
<b>zorný úhel</b>	75°
<b>Max Snímkovací frekvence</b>	30 Hz
<b>Rozhraní</b>	USB 2.0

## 5.4 Kamera 2

V druhé fázi byla použita profesionální průmyslová kamera z dílen firmy Automation Technology s označením C5. I přesto, že se tato kamera kategorizuje do na stránkách distributorů 3D kamer, dá se říci, že se jedná o typ chytré kamer. Obsahuje výpočetní jednotku, umožňující využití funkcí pro automatické hledání stopy laserového svazku. To je velkou výhodou, protože kamera přes přenosové médium neposílá objemný snímek, ale pole hodnot, prezentujících vypočítaný profil. To při plném rozlišení zmenší objem přenesených dat z 4 MB na 4 kB na jedno měření a tím zvýší i propustnost přenosového média. Samotný algoritmus je vyhodnocen pomocí integrovaného hradlového pole, které obecně zaručuje větší rychlost zpracování obrazu než procesor. Další výhodnou funkcí kamery je implementovaný HDR-3D režim poskytující multi-expoziční modely pro snímání objektů s nesterorodými odrazovými vlastnostmi. Kamera byla použita v kombinaci s objektivem Kowa LM8JC10M, disponujícím ohniskovou vzdáleností 8 mm a nastavitelným otevřením clony v rozsahu clonového čísla F1,8-22.



Obr. 21 Pohled na průmyslovou 3D kameru Automation Technology [16]

Tab. 6 Parametry kamery Automation Technology C5

<b>Rozlišení senzoru</b>	2048 x 1088	
<b>Typ senzoru</b>	CCD	
<b>Velikost pixelu</b>	5,5 um	
<b>Bitová hloubka</b>	10 Bit	
<b>Algoritmy pro nalezení laserové stopy</b>	MAX	
	TRSH	
	COG	
	FIR-PEAK	
<b>Rychlost pořízení profilů</b>	<b>Počet řádků</b>	<b>Počet profilů</b>
	1088	340
	256	1400
	16	16000
<b>Rozhraní</b>	GigE	

## 5.5 Osobní počítač

Výpočetním srdcem aplikace se stal osobní přenosný počítač značky Acer s označením Travelmate 5760g.



*Obr. 22 Pohled na osobní počítač Acer Travelmate 5760g [18]*

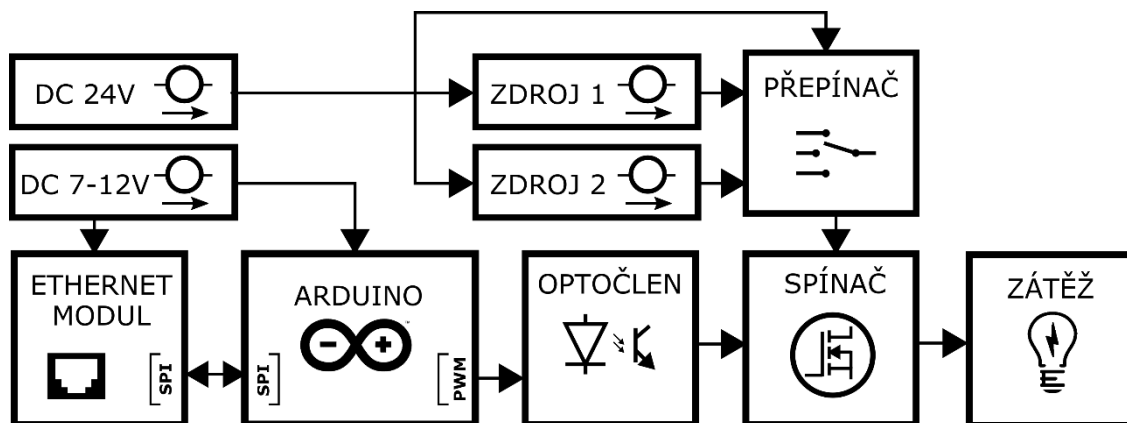
*Tab. 7 Parametry PC Acer Travelmate 5760g*

<b>Procesor</b>	Intel Core i5-2430M 2,4 GHz (2 jádra)
<b>Operační paměť</b>	8 Gb
<b>Pevný disk</b>	SSD - ADATA SP 550
<b>Síťová karta</b>	Atheros AR8151 (Gigabitový ethernet)
<b>Operační systém</b>	Windows 7 Home Premium
<b>Typ systému</b>	64 bit

## 5.6 Výkonový přepínač a omezovač

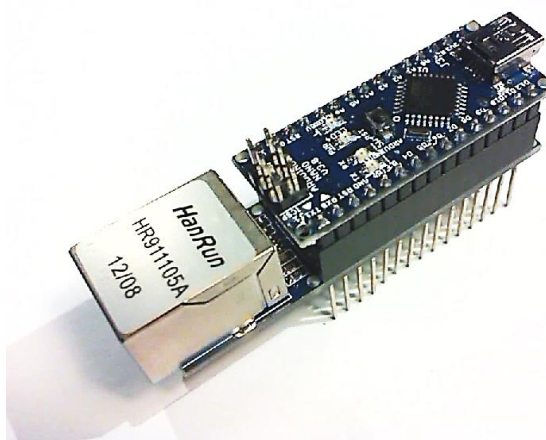


*Obr. 23 Pohled na přepínač a omezovač výkonu světla*



Obr. 24 Blokové schéma výkonového omezovače

Pro přepínání světel a jejich výkonové omezení byl navržen modul, jenž je ovládán přes TCP/IP. Srdcem modulu je platforma Arduino, což je nástroj pro vývoj aplikací stavěných na mikrokontroleru, a to zejména pro komunitu domácích kutilů. Je volně šiřitelné (open source), takže schéma zapojení včetně návrhu plošného spoje jsou volně dostupné. Kvůli malým rozměrům a nevelkým požadavkům na výkon byla pro ovládání výkonového přepínače vybrán model Nano, který je stavěný na mikrokontroleru ATmega328P a jelikož samostatné platformě chybí hardwarové vybavení pro připojení k ethernetu, byla platforma rozšířena o Ethernetový modul (Ethernet shield), který byl založen na kontroléru ENC28J60. Vybrána byla ta varianta, která je konstrukčně kompatibilní s Arduinem Nanem.

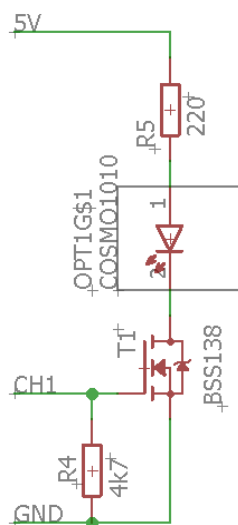


Obr. 25 Arduino Nano připojené na ethernetový modul

Inspirací pro způsob omezení výkonu byly průmyslové zdroje VAL, které výkon omezují pomocí pulzně šířkové modulace (dále PWM), což je modulace přenášející analogový signál pomocí dvoustavového signálu. U PWM jsou nastavitelné 2 parametry. Prvním je střída. To je poměr mezi vypnutým a zapnutým stavem a druhým je perioda vyjadřující délku jedné střídy. Pomocí PWM lze přenášenou informaci vyjádřit procentuálně od 0 - 100 %. [20] To přímo úměrně odpovídá přenášenému výkonu. Výhodnou vlastností PWM modulace je, že je přímo podporována mikrokontrolery, a že k realizaci základního zapojení pro omezení výkonu není potřeba žádných dalších komponentů. Omezením je, v případě Arduina Nana, maximální proudový odběr jednotlivých pinů 20 mA a maximální součet odběrů proudů 120 mA ze všech pinů. Při návrhu omezovače bylo bráno v potaz, že



Při návrhu bylo smýšleno, že maximální možný regulovatelný proud bude 2 A. To je mnohonásobně větší hodnota, než co by mohl mikrokontroler dodávat, proto se proud musí spínat přes výkonový tranzistor. Z praktických důvodů také byla celá výkonová část také galvanicky oddělena od řídicí. Rušení, jenž je generováno spínáním zátěže, pak neovlivňuje funkci obvodu a zároveň je řídicí část chráněna proti případným havarijním stavům ve výkonové sekci.



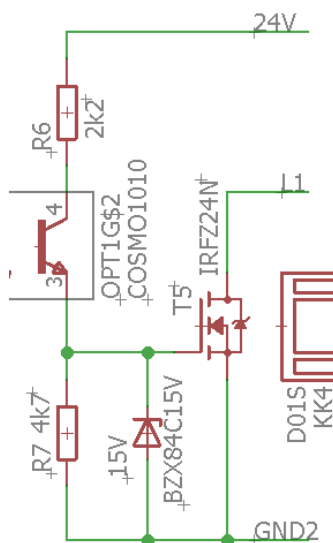
26

Pro galvanické oddělení výstupních pinů od výkonové sekce byly využity optočleny COSMO 1010, mající tranzistorový výstup a dle přenosové charakteristiky uvedené v technickém listu optočlenu má tranzistor největší zesilovací činitel při procházejícím proudu jeho LED diodou 10 mA. Na vývojové desce Arduina je zabudovaný napěťový zdroj 5V a proto je v sérii s diodou zařazen rezistor s odporem 220 Ω, který podle níže uvedeného výpočtu proud omezí na 14 mA, což je hodnota jejíž odchylka je akceptovatelná.

$$I = \frac{U_s - U_D}{R} = \frac{5 - 2}{220} = 0,014 \text{ A} \quad (4)$$

I když je proudový odběr 14 mA na pin únosný, dle doporučení výrobců je vhodné odběr z pinů ještě snížit. Toho bylo dosaženo přidáním, elektrickým polem řízeného, tranzistoru BS138 (T1) s indukovaným kanálem typu N, mezi jehož elektrody S a G byl vložen rezistor R<sub>4</sub>. Ten zaručí, že se přes něj tranzistor vypne v případě, že je neočekávaně vypnuto napájení řídicí sekce. Dle Ohmova zákona je tedy odebíraný proud omezen na  $U_{CH1}/R_4 = 5/4700 = 0,001 \text{ A}$ . Spínací úroveň tranzistoru se pohybuje v rozmezí 1,5 – 20 V a maximální procházející proud je 0,2 A. Tranzistor je tedy dostatečně dimenzovaný.

Pro napájení řídicí sekce je určen buď napájecí souosý konektor PC-GK2.1 nebo svorky umístěné vedle něj. Na desce Arduina je umístěna 5 V verze stabilizátoru ams1117, jejíž vstupní napětí se může pohybovat v rozmezí 7-12 V.



Obr. 28 Zapojení výkonové sekce PWM modulu

Proud procházející tranzistorovým výstupem optočlenu je omezen na maximálních 50 mA, proto byl do obvodu zařazen výkonový MOSFET tranzistor IRFZ24N s indukovaným kanálem typu N. Počítalo se, že výkonová sekce bude napájena z 24 V zdroje a že maximální proud, procházející tranzistorem, může dosahovat 2 A. Mezní napětí na elektrodách D a S u tranzistoru IRFZ24N činí 55 V a maximální procházející proud může nabývat až 17 A. I výkonový tranzistor je tedy dostatečně dimenzovaný. Jediné omezení, které bylo zapotřebí respektovat je napětí mezi elektrodami G a S, které se dle technického listu může pohybovat v rozmezí 4 - 20 V. Vzhledem k faktu, že tranzistor je otevírán

napájecím napětím výkonové sekce 24V, muselo být napětí sníženo, což je v obvodu zaručeno odporovým děličem realizovaným rezistory  $R_6$  a  $R_7$ , které napětí na elektrodách tranzistoru omezí dle následujícího vzorce na 16,3 V.

$$U_{G-S} = U_s \cdot \frac{R_7}{R_6 + R_7} = 24 \cdot \frac{4700}{2200 + 4700} = 16,3 \text{ V} \quad (5)$$

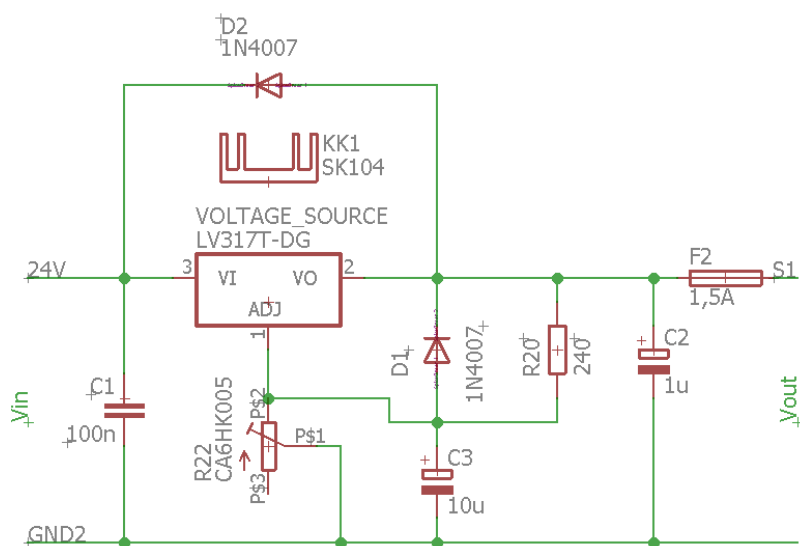
Jako ochrana proti přepětí je také mezi elektrodami tranzistoru umístěna Zenerova dioda BZX84C15V, kterou dle technického listu může protékat maximální proud v závěrném směru 50 mA. Dle výpočtů tomu nastane v případě přivedení napájecího napětí vyššího jak 103 V.

$$U_{max} = R_6 \cdot \left( I_{ZM} - \frac{U_Z}{R_7} \right) = 2200 \cdot \left( 0,05 - \frac{15}{4700} \right) = 103 \text{ V} \quad (6)$$

V souhrnu je tedy vůči zvýšenému napájecímu napětí výkonové sekce nejméně odolný přechod mezi elektrodami D a S, který bude zničen v případě připojení napětí většího jak 55 V.

Kromě LED panelů a laserů, které byly navrženy pro napájecí napětí 24V, se pracovalo i s LED panely které vyžadovali napětí nižší. To bylo důvodem vestavění dvou regulovatelných napěťových zdrojů. Obsluha si pomocí zkratovacích propojek může libovolně zvolit který z kanálů připojí ke kterému zdroji.

Oba implementované zdroje byly stavěny na stabilizátoru pevného napětí LM317T, přičemž jejich hardwarový návrh byl vytvořen na základě výrobcem doporučeného zapojení, zobrazeného na obr. 29. Řešení zahrnuje protizkratovou ochranu i možnost vložení vhodné trubičkové pojistky o rozměru 5x20 mm.



Obr. 29 Návrh napěťového regulovatelného zdroje

Hodnota výstupního napětí regulovatelného zdroje závisí na nastavení 5 k $\Omega$  trimru R<sub>22</sub> a jeho mezní hodnoty lze vypočítat z rovnice:

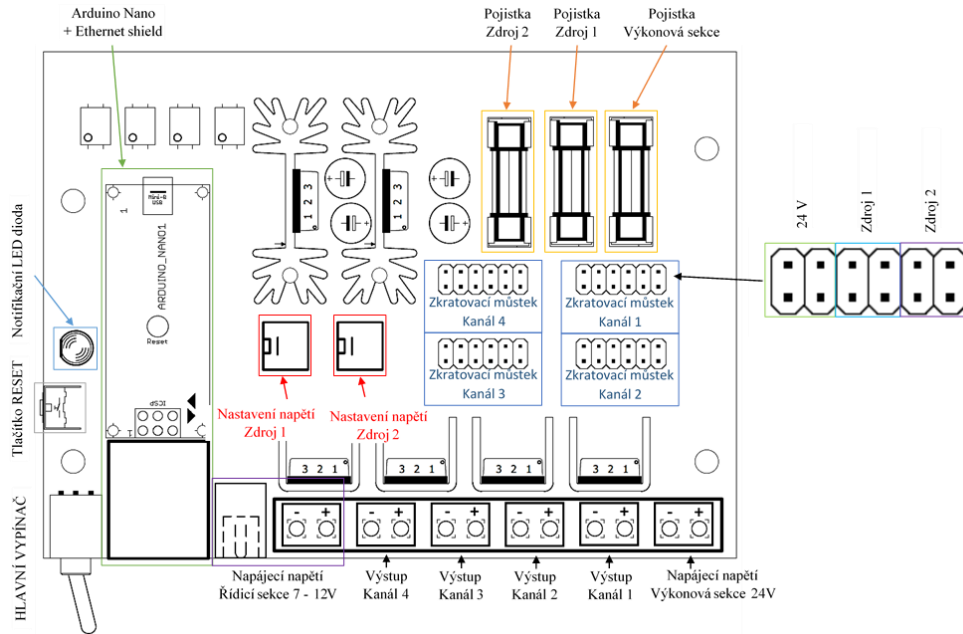
$$V_{out\_max} = 1,25 \left( 1 + \frac{R_{22}}{R_{20}} \right) = 1,25 \left( 1 + \frac{5000}{240} \right) = 27,3 \text{ V} \quad (7)$$

$$V_{out\_min} = 1,25 \left( 1 + \frac{R_{22}}{R_{20}} \right) = 1,25 \left( 1 + \frac{0}{240} \right) = 1,25 \text{ V} \quad (8)$$

K oběma LM317T byl nainstalován chladič s tepelným odporem R<sub>th</sub> = 7,2 °C/W a před zapojením světelného zdroje je kvůli životnosti zdrojů důležité spočítat, zdali jsou schopné se dostatečně chladit. V praktickém příkladu je uveden výpočet pro 15V LED panel, jehož maximální možný odebíraný proud může dle výsledku být 620 mA.

$$\text{Ztrátový výkon} = \frac{\text{Maximální teplota LM317 } [^{\circ}\text{C}] - \text{Teplota okolí } [^{\circ}\text{C}]}{\text{Tepelný odpor chladiče } [^{\circ}\text{C/W}]} = \frac{60-20}{7,2} = 5,56 \text{ W} \quad (9)$$

$$\text{Maximální odebíraný proud} = \frac{\text{Ztrátový výkon [W]}}{\text{Napětí zdroje [V] - Stabilizované napětí [V]}} = \frac{5,56}{24-15} = 0,62 \text{ A} \quad (10)$$



Obr. 30 Rozmístění komponentů na desce plošného spoje výkonového omezovače

Na obr. 30 je zobrazeno rozvržení komponent na desce plošného spoje. 2 A pomalá pojistka byla posazena do slotu pro jištění celé výkonové sekce. Pomalé pojistky 1,5 A byly dosazeny do slotů pro zdroj 1 a zdroj 2. Odbavovací proud pojistek je roven maximálnímu možnému výstupnímu proudu zdrojů, a i když zdroje v sobě mají zabudovanou vlastní nadproudovou ochranu je vhodné pojistky v obvodu mít pro případ nečekaného havarijního stavu. Obsluha si hodnoty pojistek může vyměnit dle potřeby, ale pouze za nižší hodnoty odbavovacích proudů.

Napravo od desky je zobrazen detail zkratovacího můstku kanálu 1. Ten má celkem 6 pozic pro umístění zkratovacích propojek a každý ze zdrojů se připojuje pomocí dvou. To je dáno tím, že každá propojka má maximální proudové zatížení 1 A. Kanál může být zapojen pouze k jednomu ze zdrojů.

Kryt pro výkonový přepínač byl namodelován v programu Autodesk Inventor 2017 a následně vytisknut na 3D tiskárně pomocí technologie FFD. Detail je společně s návrhem plošného spoje zobrazen v příloze č. 1. a model přiložen do elektronické přílohy ve formátu stl.

## 5.7 Osvětlení

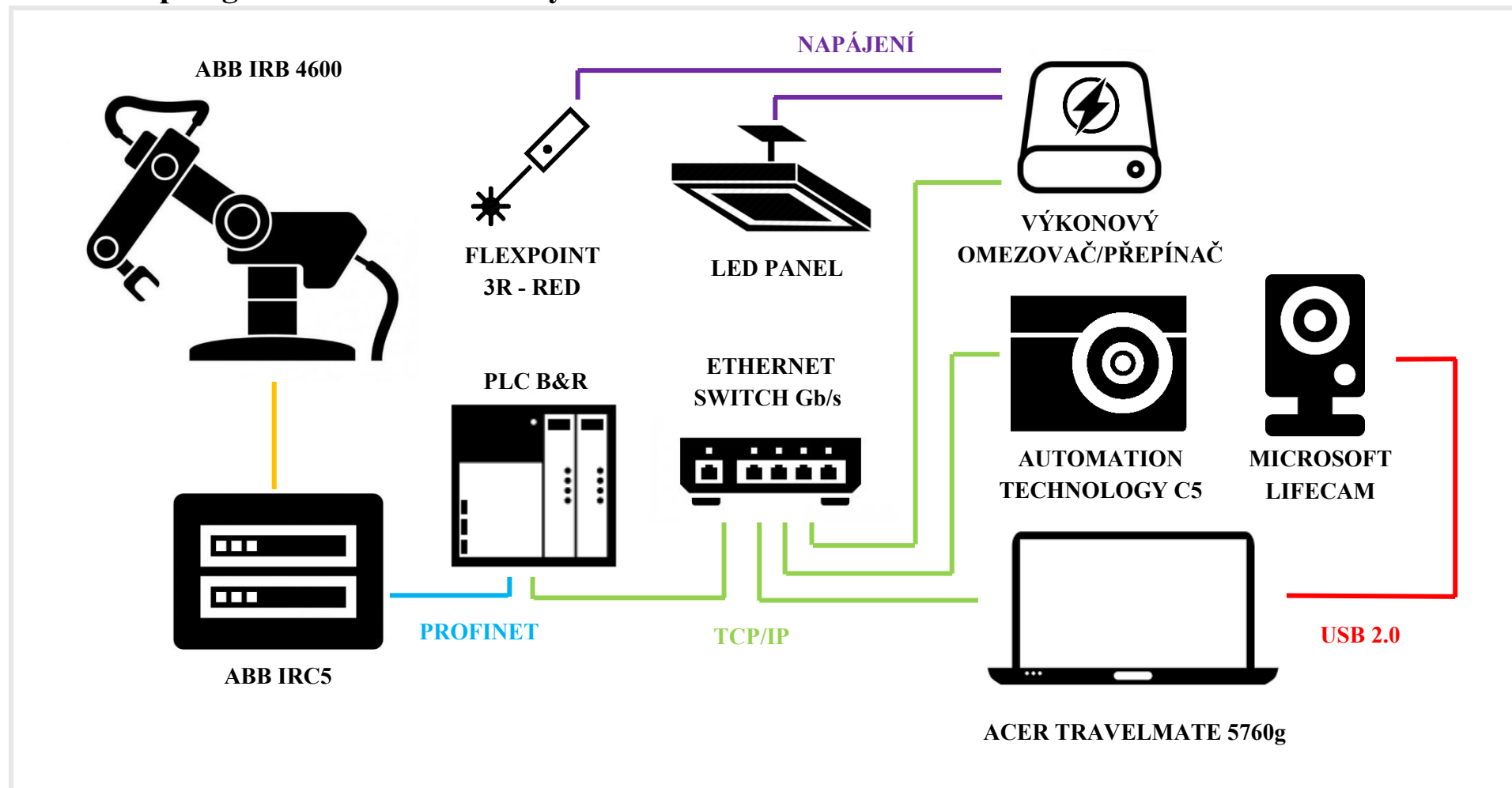
Pro osvětlení scény byl využit panel, který obsahoval řadu tří super-svitivých LED diod **LUXEON F S** s bílým světlem. Důvodem výběru byla intenzita osvětlení. Při plném výkonu panel přesvítíl parazitní okolní denní světlo (testovací pracoviště nebylo vystaveno přímému slunci). Doporučovaný proud protékající jednou diodou je 700 mA (maximálně 1A) při úbytku napětí 2,9 V. Diody jsou řazeny v sérii a proto by napájecí napětí bylo nastaveno na 8,7 V.

LED panel byl vyjmut z předních světlů automobilu, kde byl využíván jako potkávací světlo. Jako chladič posloužil hliníkový “C” profil a pro uchycení panelu k robotické paži byl v Inventoru namodelovaný rám, který byl posléze vytisknut na 3D tiskárně. Detail rámu je zobrazen v příloze č.2 a model přiložen do elektronické přílohy ve formátu stl.



*Obr. 31 LED panel*

## 5.8 Topologie hardwarové sestavy



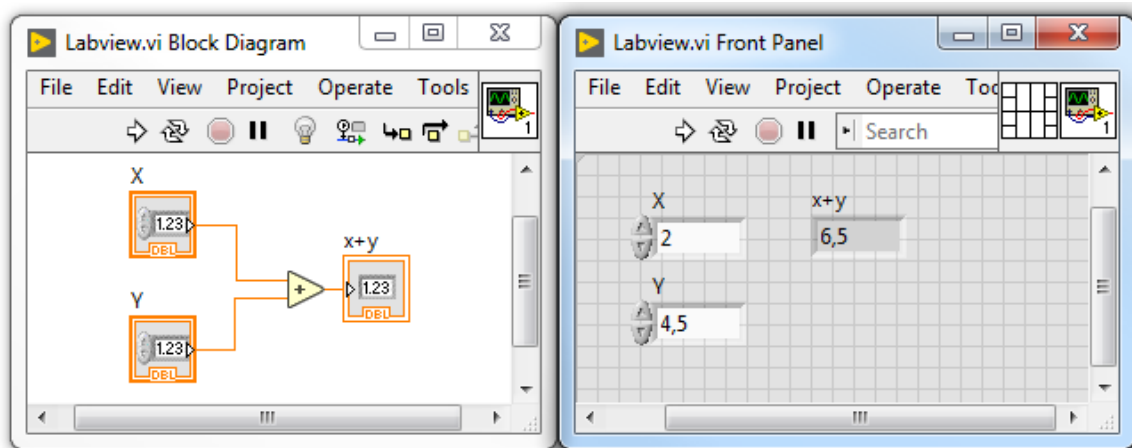
Obr. 32 Topologie sestavy

## 6 Software

V následující kapitole je popsán softwarový model a jeho jednotlivé části.

### 6.1 Labview

Neboli z anglického Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Jedná se o platformu a vývojový nástroj vyvinutý firmou National Instrument, který umožňuje programování ve specifickém grafickém programovacím jazyku “G”. Ten nevyžaduje hluboké znalosti syntaxe a je intuitivní i pro nezkušené programátory. Celý systém je založen na spojování bloků, reprezentujících určité funkce, pomocí vodičů. Sekvence běhu samotného programu není dána postupným čtením řádků, jak je tomu u konvenčních programovacích jazyků, ale datovým tokem. Jinými slovy postupným prováděním funkcí, přičemž podmínkou provedení jednoho bloku je, že všechny vstupní terminály (ekvivalent k argumentům funkcí) musí nést informaci. Rozhraní jazyka se skládá ze dvou oken. První se nazývá blokový diagram a slouží pro programování funkcionality a druhé okno, nazývajícím se čelní panel, slouží jako uživatelské rozhraní. Jazyk podporuje nesčetné množství hardwarových zařízení od senzorů, přes pohony až po procesory, ale jeho největším polem působnosti je měřící technika. Tisíce ovladačů k těmto zařízením jsou dostupné volně ke stažení a následnému komerčnímu použití. Soubor vytvořený v LabVIEW je nazýván VI (Virtual Instrument).



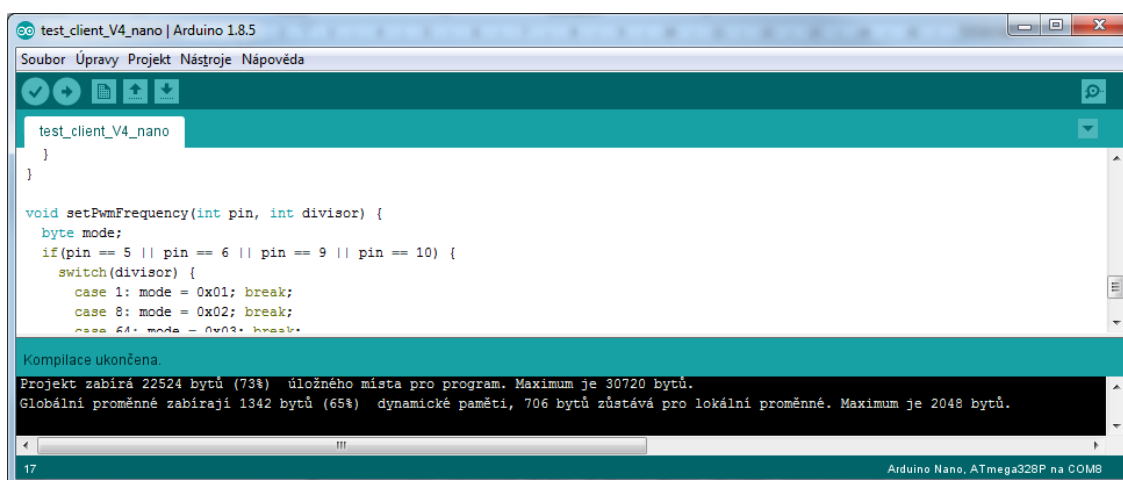
Obr. 33 Pohled na uživatelské rozhraní jazyka Labview

Samotný základní softwarový balíček LabVIEW je dostatečným nástrojem pro sběr dat a jejich analýzu, ale neposkytuje podporu pro komunikaci s kamerovými systémy a zpracování obrazu. Pro jejich dostupnost je nutné nainstalovat přídatný modul, označující se Vision Development Module, obsahující balíček s funkcemi pro komunikaci s kamerou, Vision Acquisition Software. Modul kromě pokročilých nástrojů pro analýzu snímků a videa, nabízí i vlastní uživatelské rozhraní Vision Assistant, které pomocí dostupných nástrojů a funkcí může značně urychlit vývoj aplikace pro kamerové vidění. Dále také modul umožňuje export funkcí, kompatibilních se základním programovacím prostředím LabVIEW. Vyšší programovací formu představuje vývojový nástroj Vision Builder for Automated Inspection, jehož vzhled prostředí je shodný s Vision Assistant, ale navíc obsahuje programovací

syntaxe, založené na datovém toku (flowchart structure), jejichž definice je intuitivnější a rychlejší jak v samotném LabVIEW.

## 6.2 Arduino

K programování vývojové desky Arduino Nana sloužilo stejnojmenné prostředí Arduino, které je minimalistické. V horní liště jsou zleva umístěna tlačítka pro kompilaci kódu a jeho ověření, nahrání kódu do platformy, založení nového projektu, otevření nového projektu, uložení projektu a monitorování zpráv na sériové lince. Střed okna slouží pro zápis samotného kódu a dolní část je vyhrazena informačnímu panelu.



Obr. 34 Programovací prostředí Arduino

Programovací jazyk Arduino je nazýván Wiring a jeho základy vychází z jazyka C++. Prakticky oproti C++ obsahuje vylepšenou sadu maker, které dělají programování Arduino intuitivnější. Konstrukce jazyka je kompatibilní s C, C++, takže ani zkušenější programátoři, píšící kódy pro mikrokontrolery nemusí mít se změnou problém. Nevýhodou prostředí je, že nenabízí žádný nástroj pro ladění kódu, a tak je vhodné spíše pro tvorbu jednoduchých aplikací. [22]

Kód vytvořený v Arduinu se skládá ze dvou základních funkcí, které v kódu vždy musí být obsaženy.

První je **void setup ( ) { }**, což je funkce určená pro příkazy, které mají být provedeny pouze jednou a to před spuštěním hlavní smyčky. Do této funkce se zahrnují počáteční konfigurace.

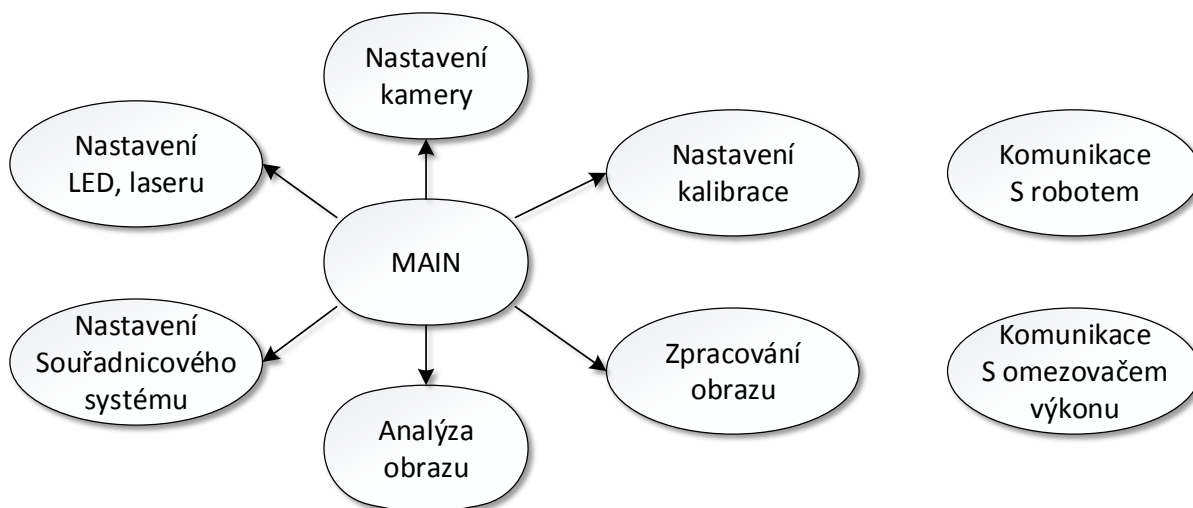
Druhá funkce je **void loop ( ) { }** zastupuje hlavní smyčku a cyklicky se opakuje až do restartu či vypnutí Arduino. Programátor by neměl zkoušet ze smyčky vystoupit vrácením návratové hodnoty. Vedlo by to k nepředpověditelnému chování.

Knihovny, makra a deklarace proměnných by se standardně měli nacházet v záhlaví programu.



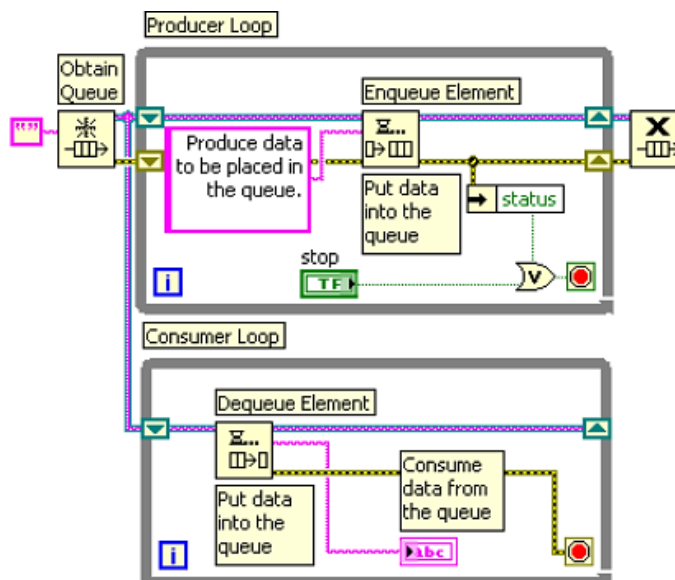
## 6.3 Struktura programu

Při realizaci byly použity dvě kamery s odlišnými vlastnostmi a funkcemi, a kvůli případnému uplatnění kódu v dalších projektech s odlišnými kamerami, se zachování modularity stalo jedním z klíčových cílů. Struktura programu by proto měla být obdobná a pouze některé části programu obměněny. Myšlenku modulárního systému je potřeba zachovat i z důvodu, že v případě instalace systému u zákazníka bude použit jiný manipulátor, enkodér zachycující rychlost pohybu soustavy, či jiná nedefinovaná zařízení. V každém případě i samotný osobní počítač nelze implementovat do úlohy řízení v reálném čase, protože systém není navržen tak, aby byl deterministický. Dá se tedy očekávat, že některé bloky mohou být transformovány a nahrány do hardwarových komponent, které to umožňují.



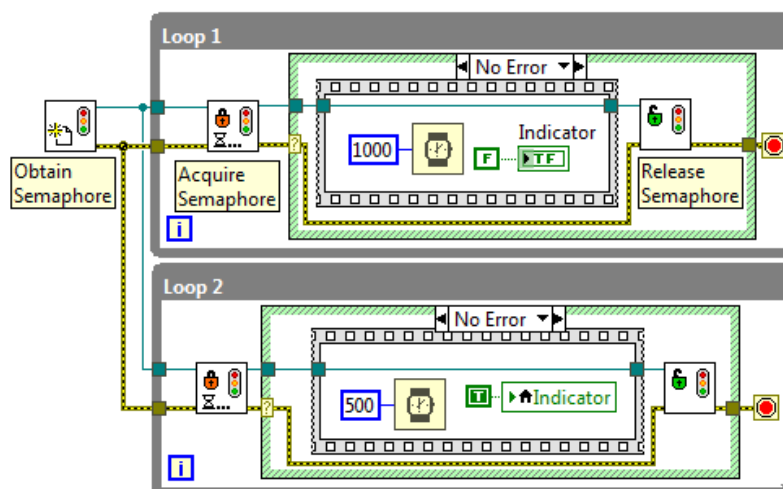
Obr. 35 Softwarová struktura, jednotlivé pod-části

Na výše uvedeném obr. 35 je zobrazena struktura aplikace, kde je celý softwarový model kvůli výpočetní úspoře aplikace založen na toku řízeném událostmi (events), jehož praktickou vlastností je, že jednotlivé pod-části programu jsou provedeny pouze na základě podmětu, kterým může být například reakce na změnu hodnoty ovládacího prvku čelního panelu. Program pak nepracuje s vyčtenou hodnotou periodicky, ale vykonává danou část kódu jenom v případě, že hodnota byla změněna operátorem. Pro tento typ přístupu je vhodná předpřipravená šablona s programovým modelem producent-konzument, kde producent v reakci na události generuje do fronty zprávy. Konzument je vyčítá a podle jejich obsahu spouští různé části kódu. Jádrem konceptu je znázorněno na obr. 36, kde horní smyčka prezentuje producenta. Ten pomocí funkce **Enqueue Element** zařazuje textový řetězec do fronty. Níže situovaná smyčka zastupuje konzumenta, který pomocí funkce **Dequeue Element** vrací poslední zařazený prvek, a to pomocí zásobníkové paměti typu FIFO (First In First Out), tedy první zařazená zpráva bude z fronty vyčtena jako první. Obrázek 36 je pouze demonstrativní.



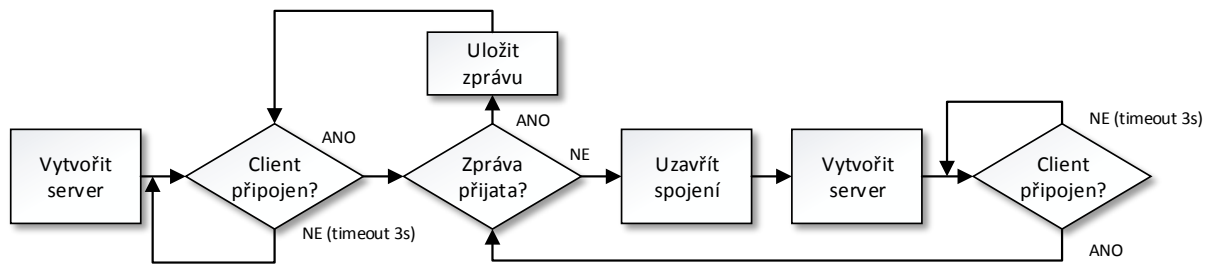
Obr. 36 Vzor pro model producent/konzument

Dále si lze v diagramu softwarové struktury všimnout, že modul komunikace s robotem běží odděleně. V aktuálním řešení je komunikace zajištěna pomocí TCP/IP protokolu a kvůli časovým latencím, způsobených dobou inicializace spojení mezi PC a PLC, je pro kontinuitu celého procesu měření nezbytné, aby komunikační kanál běžel nezávisle na producentovi. To bylo vyřešeno vložení funkcí do nezávislé smyčky, popsané v další kapitole. Separace smyček sebou ovšem nese potřebu synchronizačního mechanismu, a to proto, že nezávislá smyčka komunikující s PLC produkuje data, jenž musí být sdílena i do smyčky konzumenta. Eliminace kolize, způsobené nesynchronizovaným přístupem obou smyček ke stejnému datovému prostoru ve stejný čas, byla vyřešena softwarovým semaforem, jehož zjednodušená interpretace je zobrazena na obrázku 37. Funkce **Acquire Semaphore** vyčkává, dokud není semafor otevřený. V momentě kdy to nastane je semafor uzavřen a následující část kódu, obsahující přepnutí indikátoru a vyčkání specifikované časové prodlevy, je provedena. Po uplynutí prodlevy je semafor otevřen pomocí funkce **Release Semaphore** a přístup uvolněn druhé čekající smyčce, jejíž funkce je v aktuálním případě identická s první smyčkou.



Obr. 37 Zjednodušená ukázka funkce semaforu

## 6.4 Komunikace s Robotem/PLC

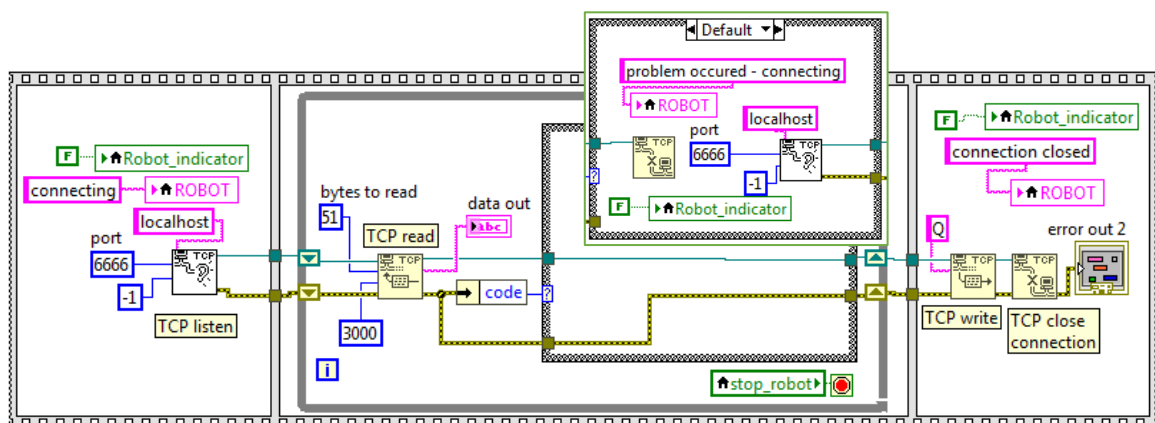


Obr. 38 Diagram algoritmu pro komunikaci s robotem

### 6.4.1 Popis softwarové realizace komunikace

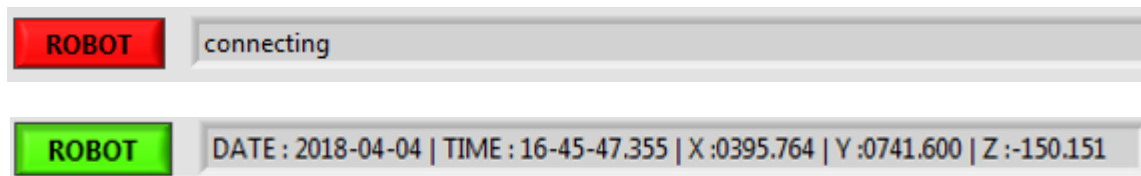
Na níže uvedeném obr. 39 je zobrazena zjednodušená část kódu obsluhující komunikaci s PLC. Celá funkčnost je stavěna na základě stálého odposlouchávání, kdy Robot posílá přes profinet aktuální souřadnice polohy ramena. PLC po obdržení zprávy k textovému řetězci přidá časovou značku a zprávu dále zpřístupní naslouchajícímu serveru s definovanou IP adresou na portu 6666. IP adresa musí být u osobního počítače nastavena ručně. V operačním systému Windows je toto nastavení dostupné v centru síťových připojení, pod nastavením připojení k místní síti pomocí Ethernetu. Obsah zprávy je aktualizován a posílán periodicky s frekvencí 2 ms.

Uvedené argumenty inicializační funkce **TCP listen** obsahují referenční označení localhost, číslo portu 6666 a timeout, jehož nastavená hodnota -1 prezentuje nekonečné čekání na navázání spojení. V případě použití kladného čísla, je doba vyčkávání udávána v milisekundách. Pro druhý blok **TCP read** je specifikována velikost zprávy v bytech, tedy 51. Timeout s hodnotou 3000 ms byl v daném případě určen experimentálně. Vyčtený řetězec je uložený do proměnné data\_out a obsahuje ASCII znaky. Funkce je zacyklená a v případě bezproblémové komunikace data vyčítá neustále. V momentě výskytu problému, například vypnutí PLC, nebo neočekávané vyjmutí vodiče z konektoru dojde po 3000 ms čekací době k aktivaci alternativního kódu v struktuře **case**, komunikační kanál je uzavřen, obsluha informována o výskytu chybného stavu a provede se opětovná inicializace komunikace. V případě ukončení běhu celého programu je smyčka ukončena, kanál uzavřen a obsluha informována o uzavření komunikace.



Obr. 39 Zjednodušený kód pro komunikaci s PLC pomocí TCP/IP

Na čelním panelu je komunikaci s PLC vyhrazen prostor v levém dolním rohu vizualizace, obsahující dvoj-stavový indikátor, jehož barva je buď červená v případě nenavázané komunikace, nebo zelená v případě bezproblémové komunikace s PLC. Vedle indikátoru je lišta určená pro zobrazení aktuálně obdržených dat z PLC, nebo pro oznámení o stavu spojení.



Obr. 40 Indikátor stavu a přijatých dat z robota

Jak bylo výše zmíněno přichází zpráva obsahuje 51 bytů s ASCII znaky. Po jejich “přeložení” do čitelné podoby je obdržen řetězec:

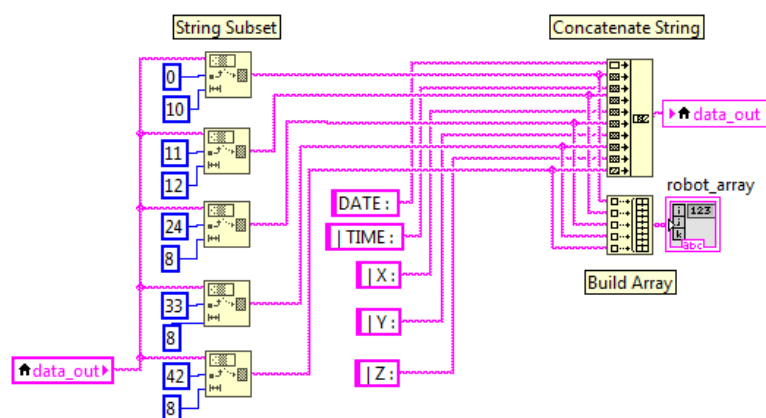
2017-11-03-10-44-25.829;0422.437;0936.857;0235.603

jehož jednotlivé členy jsou:

Tab. 8 Rozklad zprávy z PLC na jednotlivé členy

Datum	Čas	Osa X	osa Y	OsaZ
2017-11-03	10-44-25.829	0422.437	0936.859	0235.603
RRRR-MM-DD	hh-mm-ss.sss	(mm)	(mm)	(mm)

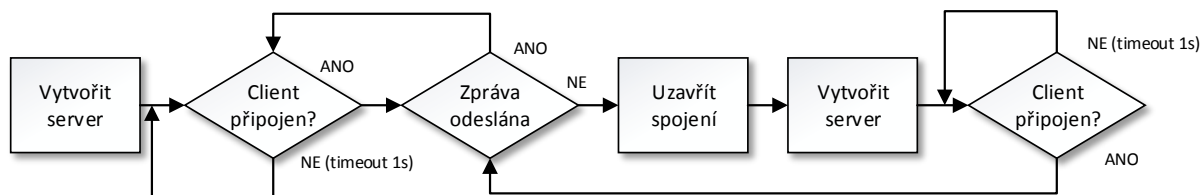
V případě nutnosti práce s jednotlivými členy bylo zapotřebí řetězec rozdělit, čehož bylo docíleno vícenásobným použitím funkce **String Subset**. Pro zobrazení v uživatelském rozhraní byly mezi jednotlivé členy vloženy značení pomocí funkce **Concatenate String** a pro práci s jednotlivými informacemi byli členy vloženy do pole stringů pomocí funkce **Build Array**. Jejich pořadí odpovídá tabulce 8.



Obr. 41 Úprava řetězce obdrženého z PLC

## 6.5 Komunikace mezi PC a výkonovým přepínačem

### 6.5.1 Program v LabVIEW



Obr. 42 Diagram algoritmu pro komunikaci s výkonovým omezovačem

Část programu pro komunikaci s výkonovým omezovačem je podobná jako v případě komunikace s PLC, popsané v kapitole 5.4. PC vytvoří Server a čeká než se k němu na portu 5556 připojí klient, kterému jsou posílány periodicky každých 0,3 s zprávy vyjadřující nastavení výkonů na jednotlivých kanálech. Interval 0,3 s byl zvolen proto, aby smyčka nepřetržitě nezatěžovala běh hlavního programu a přenosového media, ale zároveň, aby zpoždění mezi zasláním zprávy a změnou výkonu nebylo markantní.

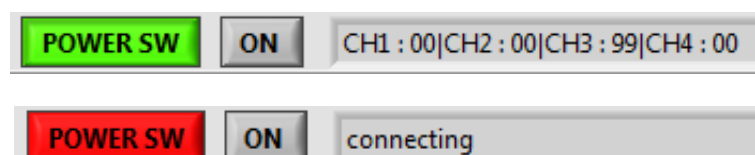
Obsahem odeslané zprávy je vždy 8 znaků, které jsou tvořeny pouze číslicemi v rozmezí 0-9 a každého z kanálu je dán dvojicí znaků. Demonstrativní nastavení je znázorněno v tabulce 9.

Tab. 9 Příklady zpráv odeslaných do výkonového omezovače

Zpráva	Výkon [%]			
	Kanál 1	Kanál 2	Kanál 3	Kanál 4
01234567	1	23	45	67
00105090	0	10	50	90
99290000	99	29	0	0

Pro indikaci nastaveného výkonu jednotlivých kanálů je určena část v pravém dolním rohu. Ta se stává z dvoj-stavového indikátoru, který je zelený v případě bezproblémového připojení, nebo červený v případě navazujícího spojení či jeho ztráty. Uprostřed leží tlačítko, určené pro vypnutí všech kanálů, které má nejvyšší prioritu a v případě jeho sepnutí budou kanály vypnuty nezávisle na jakémkoliv jiném nastavení.

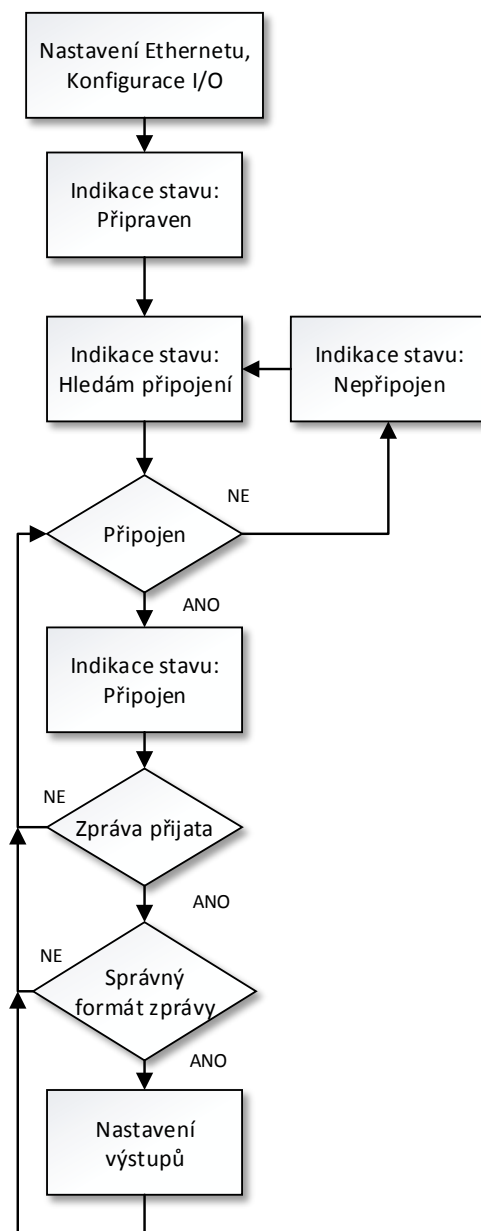
Vpravo leží indikátor textových řetězců, který oznamuje stav připojení, nebo aktuálně odesílané nastavení výkonů.



Obr. 43 Indikátor stavu a nastavení výkonu pro výkonový omezovač

Kód pro realizaci komunikace je téměř shodný s kódem na obr. 39. Jedinou změnou je náhrada funkce **TCP write** za **TCP read**, jejíž vstupními parametry jsou timeout, který je nastavený na 1s a textový řetězec, jenž je odesílán.

## 6.5.2 Program v Arduinu



Obr. 44 Diagram algoritmu mikrokontroleru

Jelikož je použitý Ethernetový modul s mikrokontrolerem ENC28J60 neoficiálně podporovanou komponentou, bylo pro jeho zprovoznění nutné stáhnout patřičnou knihovnu. Těch bylo na internetu k dispozici více, ale nejvhodnějším adeptem se stala knihovna s názvem UIPEthernet.h, protože se její názvy funkcí i způsob jejich využití shoduje s oficiální knihovnou Ethernet.h, která slouží pro programování modulů založených na mikrokontrolerech W5100. To je výhodné z hlediska přenositelnosti kódu.

V samotném kódu pak nastavení připojení probíhá pomocí těchto funkcí:

```
byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };    //MAC adresa
IPAddress server(10,12,18,253);                          //IP adresa PC
IPAddress ip(10,12,18,252);                              //IP adresa ethernetového modulu
Ethernet.begin(mac, ip);                                //Příkaz pro spuštění komunikace
```

V bytovém poli **mac[]** se nachází MAC adresa zařízení, která musí být v celé síti jedinečná a vzhledem k faktu, že se lze setkat s neoriginálními moduly, kterým MAC adresa oficiálně přidělena nebyla, je vhodné zařízení zapojovat pouze do soukromých sítí, kde je zajištěno, že nezpůsobí kolizi. IP adresa serveru je IP adresa PC a musí být pevně nastavena v centru síťových připojení, v nastavení připojení k místní síti pomocí Ethernetu. Poslední uvedený příkaz **Ethernet.begin()** slouží pro spuštění komunikace a je umístěn do inicializační části kódu.

V hlavní smyčce jsou pro komunikaci mezi Arduinem a Ethernetovým modulem využity tyto funkce:

```
EthernetClient client;
client.connect(server,port);
client.available();
client.read();
client.connected();
```

Funkce **connect()** slouží pro hledání a navázání připojení spojení se serverem, jehož parametry jsou definovány pomocí argumentů funkce (IP adresa a port serveru). V případě úspěšného navázání spojení funkce vrací hodnotu 1. V dalším kroku se pomocí funkce **available()** zjistí, zdali server připravil nějaké data pro čtení a mohou být vyčteny pomocí funkce **read()**, která může vyčíst pouze poslední byte. Programátor tedy musí předem očekávat, jak dlouhá zpráva bude, a kolikrát při obdržení telegramu funkci využít pro vyčtení kompletní zprávy. Poslední zmíněná funkce **connected()** vrací buď 1 nebo 0 a slouží pro kontrolu aktivity připojení.

Indikace všech stavů výkonového omezovače, týkajících se připojení, je realizována RGB LED diodou, jejíž katody jsou připojeny na piny A0, A1 a A2. V tabulce č. 10 je uveden výčet stavů s jejich vizuální reakcí.

*Tab. 10 Výčet možných stavů a následných reakcí LED indikátoru*

Stav	Reakce
Připraven	2x krátce blikne zelená
Hledání připojení	konstantně svítí modrá
Nepřipojen	1x krátce blikne červená
Připojen	konstantně svítí zelená

Po vyčtení zprávy je nutné zkontrolovat její obsah, což je založené na faktu, že každý jeden znak se může pohybovat v rozmezí 0-9. To je v ASCII znacích prezentované v dekadické interpretaci rozmezím 48 – 57 a v případě, že se kterýkoliv znak v daném rozmezí nenachází, je zpráva zahozena a čeká se na přijetí další zprávy. Když je formát v pořádku, testuje se, zdali se obsahem zpráva neshoduje s tou poslední. Pokud tomu tak je, zpráva se opět ignoruje. V opačném případě se podle obsahu zprávy přenastaví výkon kanálů.

```
PWM = (int)round(2.57*(inString.toDouble()));    // Převedení a přepočítání výkonu
analogWrite(channel,PWM),                      // Nastavení výkonu
```

Před nastavením výkonu jednotlivých kanálů se nejdříve musí textový řetězec se dvěma znaky převést na proměnou typu **double** a následným vynásobením konstantou 2,57 škálovat rozsah z 0 -99 na 0 – 255 se kterým pracuje funkce pro nastavení PWM. V posledním kroku se funkce zaokrouhlí pomocí funkce **round()** (zahrnutá ve standardní knihovně math.h) a přetypuje na proměnou typu integer, která je očekávaným v argumentem funkce pro nastavení PWM **analogWrite()**.

V základním režimu je frekvence PWM pinů 3 a 9 nastavena na 980 Hz a u pinů 5 a 6 je to 480 Hz. Rozdíl je dán tím, že mikrokontroler ATmega328P má integrované 2 čítače k nimž mohou být připojeny PWM piny a každý z nich funguje na rozdílných frekvencích.

Výsledná frekvence na daném pinu je dána podílem základní frekvence a děliče, přičemž v základním stavu jsou na všechny PWM piny připojeny děliče 64.

*Tab. 11 Přehled základních frekvencí a děličů na jednotlivých PWM pinech.*

Kanál	Pin	Základní frekvence [Hz]	Dostupné děliče frekvence
1	3	31 250	1,8,32,64,128,256,1024
2	5	62 500	1,8,64,256,1024
3	6	62 500	1,8,64,256,1024
4	9	31 250	1,8,64,256,1024

V případě, že některé frekvence PWM jsou pro dané osvětlení nevhodné, je možné si frekvenci přenastavit změnou děliče na jednotlivých kanálech pomocí funkce:

```
void setPwmFrequency(int pin, int divisor),
```

Funkce není obsažena v základních knihovnách Arduina a byla programována v jazyku C přímým maskováním registrů. Argumenty funkce jsou PWM pin a velikost děliče, jenž je omezen na hodnoty uvedené výše v tabulce 11. V případě vložení nepodporované hodnoty se dělič automaticky nastaví na hodnotu 64.

Frekvenci PWM není možné nastavit během běhu programu, ale pouze nahráním celého kódu se změnou do platformy.



## 6.6 Nastavení - kamera 1



Obr. 45 Obrazovka nastavení kamery

První záložka uživatelského prostředí aplikace **Camera Settings** slouží k nastavení klíčových parametrů webkamery, které budou následně uloženy a načteny při dalším použití aplikace. Následující parametry jsou měnitelné:

### Camera Name

Ve většině případů mají přenosné laptopy k dispozici vlastní zabudovanou webkameru, a proto bylo zapotřebí v aplikaci uživateli umožnit výběr jednotlivých zařízení připojených na jednotlivé USB porty. Pokud zařízení je fyzicky připojené a není ve výběru dostupné, je vhodné si jeho přítomnost ověřit v prostředí NI MAX, umožňujícím rychlý přístup k hardwarovým komponentům a jejich nastavení. V případě, že zařízení není dohledatelné v prostředí NI MAX je pravděpodobné, že v systému nejsou instalované požadované ovladače a při použití operačního systému Windows je nutné tento problém vyřešit ve správci zařízení.

### Video Mode

Je běžné, že webkameře lze nastavit výstupní režim, jenž je prezentován kladným číselným označením a nepsaným pravidlem je, že se vzrůstající hodnotou video režimu se zvyšuje i rozlišení kamery. Kromě rozlišení se jednotlivé módy mohou lišit ve výstupním formátu (Vision Acquisition Software pokrývá jejich omezené množství), ve snímkovací frekvenci, v barevnosti, barevném modelu a bitové hloubce. Nejsou ovšem nijak standardizované a jejich vlastnosti je tedy nutno nastudovat z referenčního manuálu kamery, případně experimentálním způsobem. Parametry módu pak mohou být vyčteny v informační liště, nacházející se pod oknem se zachycenou scénou.

### Orientation

Ne vždy mechanické a konstrukční provedení dovoluje instalaci kamery v její žádané orientaci vůči měřené scéně. Navíc je v některých případech výhodnější kameru otočit, tak aby její delší strana snímala výškový profil a tím zajistila větší hloubkové rozlišení. Proto je v nastavení obsažena i možnost změny orientace.

## Exposure Time

Slouží ke změně expozičního času. Jednotlivé typy webkamer mohou mít různý rozsah, proto je případně vhodné si rozsah v programu přizpůsobit. Kamera Microsoft Lifecam má rozsah nastavení pro expoziční doby 0,000123 – 1 s. U kamery je také důležité, aby byly vypnuty algoritmy pro vyvážení střední šedé a automatické korekce barevných složek. Neboli aby byl pořízený snímek odeslán v neupraveném stavu.

## Focus

Podobně jako je tomu u expozičního času i nastavení ostřicí roviny se bude lišit u jednotlivých kamer. Zde je krajně nevhodné využití automatického režimu, který by mohl ostřit na objekty které se nenachází v oblasti zájmu. Při ladění nastavení je vhodné ověřit ostrost laserové stopy v celém výškovém rozsahu snímané oblasti.

## LW\_CH1 - LW\_CH4

Posuvné jezdce jsou určeny k nastavení výkonu jednotlivých kanálů omezovače výkonu. Hodnota se může procentuálně měnit od 0 - 99.

## Save Settings

Tlačítko slouží pro uložení aktuálního nastavení do konfiguračního souboru. Ze souboru je nastavení načteno v případě zapnutí aplikace, nebo přepnutí kanálu.

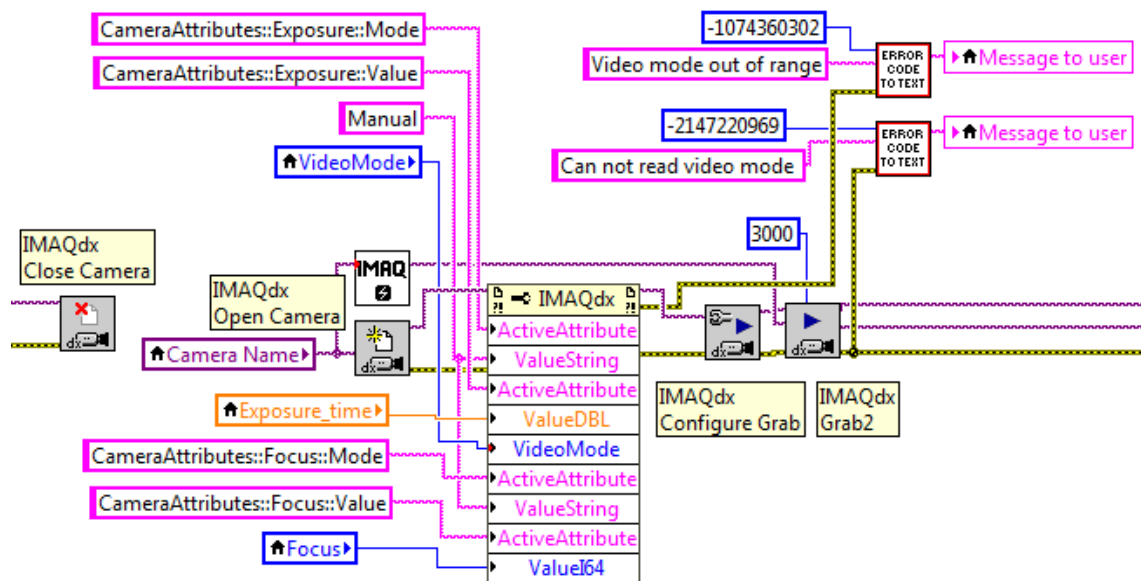
## Setting1/Setting2

Aplikace dovoluje ukládat a přepínat mezi dvěma uloženými profily, které mimo výše uvedeného nastavení načítají i kalibrační údaje.

## Grab

Tlačítko Grab slouží pro změnu režimu snímání. V základním nastavení je obraz kontinuálně obnovován a v případě aktivace tlačítka je obraz pozastaven k bližší analýze. Problém u použité kamery byl takový, že při změně nastavení se finální dopad změny projevil až po pořízení desátého snímku. Proto je mezi zmáčknutím tlačítka a pozastavením obrazu zpoždění 330 ms (doba pořízení 10 snímků).

Programové řešení nastavení je zobrazeno na obrázku 46. K obsluze a nastavení kamery je využito funkcí nižší úrovně, jenž jsou dostupné v modulu Vision Acquisition Software. Jejich skupinové označení je **IMAQdx** (dx značí práci s videem). Před aplikací nového nastavení je kvůli eliminaci případné kolize vhodné uzavřít relaci pomocí **IMAQdx Close Camera**, kameru opět inicializovat a samotné nastavení upřesnit pomocí funkce **Property Node**. Upřesnění nastavení bohužel nelze vyřešit univerzálně, jelikož v přístupu k některým unikátním nastavením musí být specifikována cesta, která bude u různých výrobců mít jiný tvar. V náhledu kódu je tato cesta reprezentována textovými řetězci napojenými na vlastnost (property) **Active Attribute**. Nejrychlejším způsobem vyhledání formulace pro jednotlivé atributy je náhled v prostředí **NI MAX**, případně v samotném LabVIEW kódu využití funkce **IMAQdx Enumerate Attributes**, jejíž výstupem je pole všech dostupných atributů připojeného zařízení.



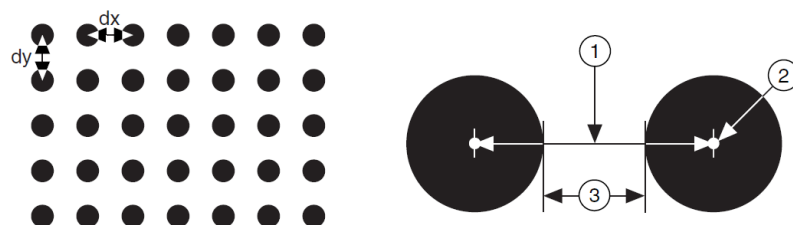
Obr. 46 Změna nastavení kamery v Labview

## 6.7 Horizontální kalibrace - Kamera 1

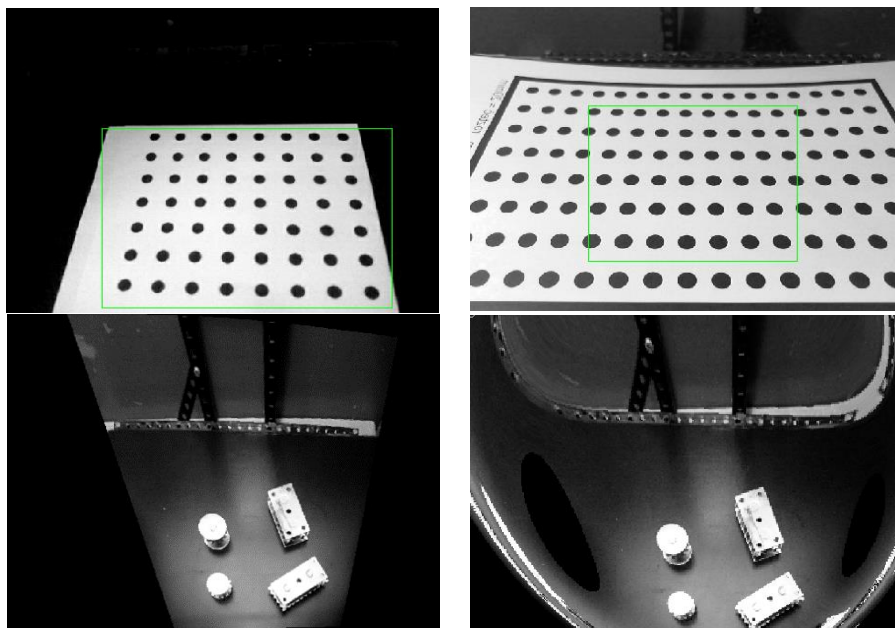
### 6.7.1 Kalibrační vzor

Kalibrace kamery v LabVIEW je umožněna pomocí bodového kalibračního vzoru (Dots Grid). Velmi přesné kalibrační vzory jsou na trhu nabízeny specializovanými prodejci, ale pro případné testování funkce, či při návrhu aplikace s nízkými nároky na přesnost je možné si vzor navrhnout a vytisknout v domácích podmínkách. Návrh maximálně funkčního vzoru pro kalibrační algoritmy LabVIEW by měl být vytištěn v nejvyšší možné kvalitě tiskárny a také by měl splňovat následující parametry:

- Vzdálenost mezi body ve vertikální i horizontálním směru by měla být shodná ( $dx = dy$ ).
- Puntíky by měly pokrývat celou oblast zájmu.
- Poloměr jednotlivých bodů by měl v pořízeném snímku ležet mezi 6 – 10 pixelů.
- Vzdálenost bodů od středu ke středu by v pořízeném snímku měla činit 18 – 32 pixelů.
- Minimální vzdálenost mezi kraji puntíků by měla být alespoň 6 pixelů.



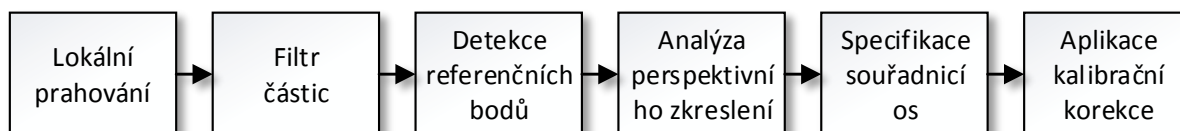
Obr. 47 Kalibrační vzor pro IMAQ. 1 – vzdálenost od středu ke středu, 2- Střed bodu, 3 – vzdálenost mezi kraji bodů



*Obr. 48 Ukázka následků nesprávného návrhu kalibračního vzoru*

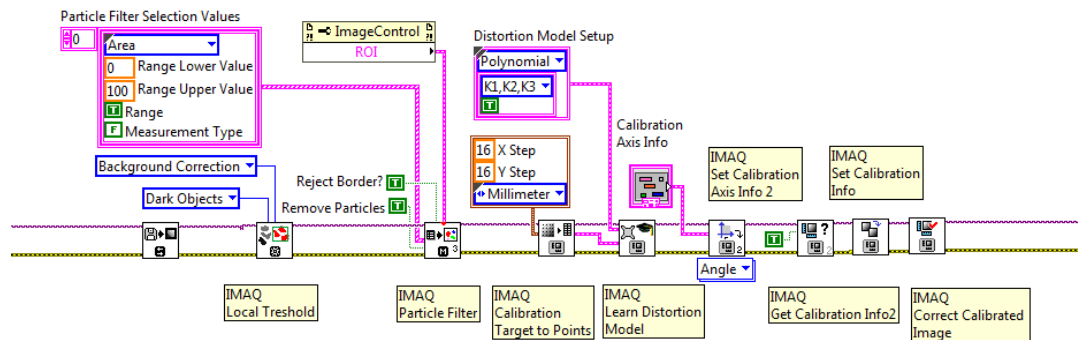
Obr. 48 poukazuje na následné nežádoucí distorze v případě nedodržení parametrů kalibračního vzoru. Levá část ukazuje vzor, kde byl dodržen kompletní výčet podmínek. V pravé části je na kalibračním vzoru rozdílný odstup mezi body v ose x a y.

### 6.7.2 Kalibrační sekvence



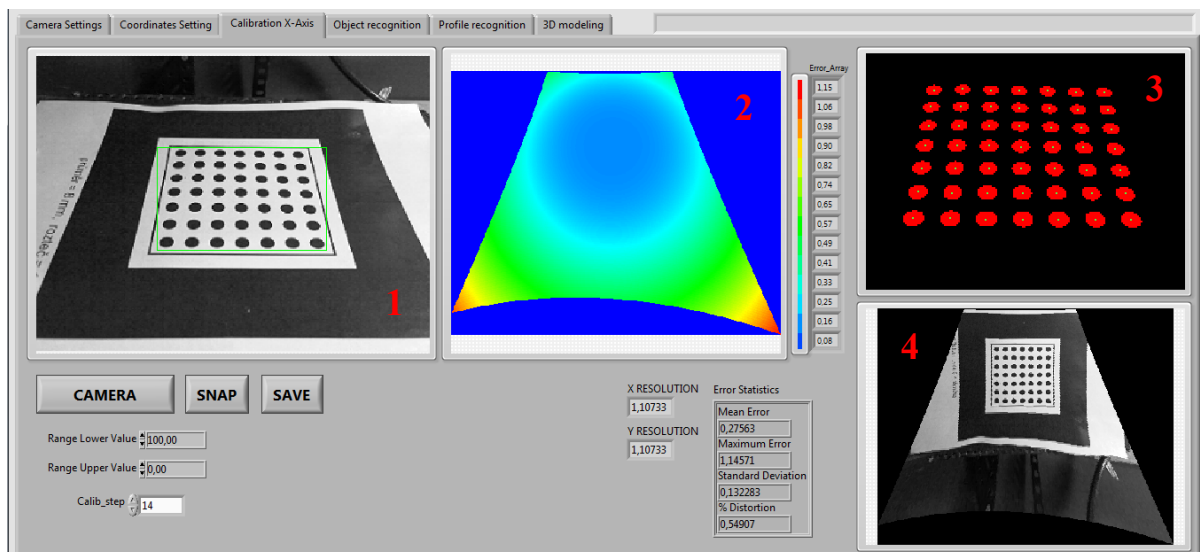
*Obr. 49 Diagram kalibrační sekvence*

Před aplikací kalibračních algoritmů, je nutné snímek upravit vhodným způsobem, tedy aby body kalibračního vzoru byly výrazné, kontrastní a aby co nejvíce zanikalo blízké okolí kalibračního vzoru. Samotný algoritmus je navržen pro zpracování monochromatického snímku, ve kterém se v úvodní fázi pomocí lokálního prahování vyrovná kontrast bodů a potlačí pozadí. V dalším kroku podle uživatelem zadané specifikace velikosti “skvrn” algoritmus vyselektuje jednotlivé body a najde jejich lokální těžiště. Před samotnou analýzou zkreslení je potřeba správně nastavit reálné vzdálenosti středů bodů v obou osách a specifikovat jednotku míry. V poslední fázi se pak upřesňuje střed souřadnicového systému, který v základním nastavení bývá umístěn v levém horním rohu snímku. Kalibrační sekvence je zakončena finální korekcí obrazu.



Obr. 50 Kalibrační sekvence v Labview

Veškeré potřebné komponenty jsou v LabVIEW dostupné v paletě **Vision and Motion – Calibration** a jejich pořadí je znázorněno na obr. 50. Zde obsluhou měnitelné nastavení vyžaduje funkce **IMAQ Particle**, jejíž vstupní argumenty určí dolní a horní mezní hranici pro velikost selektované “skvrny” v pixelech. Také nastavení funkce **IMAQ Learn Distortion Model** vyžaduje vyšší pozornost. Algoritmus, vypočítávající zkreslení, disponuje pěti možnými modely, přičemž aktuálně nastavený polynomičtý model s korekcí tangenciálního zkreslení poskytuje největší přesnost kompletní kalibrace snímku. Daní za přesnost je zdlouhavé zpracování, a v případě neúnosných časových intervalů, při práci se snímkem o vysokém rozlišení, lze dobu zpracování zkrátit zvolením jiného modelu. Intuitivní a rychlé ověření kvality a přesnosti alternativních modelů lze ověřit v prostředí Vision Assistant a v jeho průvodci kalibrací **NI Calibration Training Interface**.

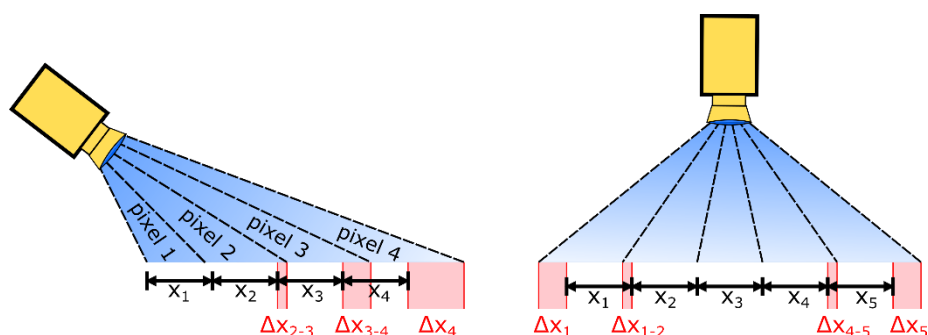


Obr. 51 Uživatelské rozhraní pro kalibraci snímku

Některé z mezikroků kalibrace jsou pro lepší orientaci zobrazeny v uživatelském prostředí vzáložce **Calibration X-Axis**. V okně č. 1 je pořízený snímek, jehož jedinou úpravou je převod do černobílého podání pomocí funkce **IMAQ ExtractSingleColorPlane**. Na snímku lze pomocí obdélníkového nástroje vybrat oblast zájmu, jejíž vnější část se v dalších krocích ignoruje. Pro úspěšnost kalibrace je důležité obdélníkovým nástrojem vybrat oblast s kalibračním vzorem co nejpřesněji.

Okno č. 3 zobrazuje, které z kalibračních bodů algoritmus vyhodnotil jako platné a v případě dostatečného přiblížení se zobrazí zelený pixel určující jejich těžiště, které je stěžejní pro výpočet samotné kalibrace. V případě, že se zelené pixely objeví mimo těžiště kalibračních bodů, bude kalibrace nepříjemně zkreslená. Během testování to bylo důvodem většiny neúspěšných kalibrací. Souřadnice jednotlivých těžišť lze jako pole hodnot získat z výstupu značeném jako **reference points** funkce **IMAQ Calibration Targets to Points**.

Okno č. 2 zobrazuje mapu chyb, které jsou způsobeny zkreslením geometrie. Mapa pomocí duhového spektra prezentuje možnou odchylku naměřených rozměrů od skutečných. Nejmenší chyba bude vždy v místě, kde umístěn kalibrační vzor a v částech obrazu které jsou fyzicky umístěny blíže ke kameře. Očíslená stupnice, umístěná vedle grafu, zobrazuje velikost chyby v definované jednotce míry, v základním nastavení v milimetrech.

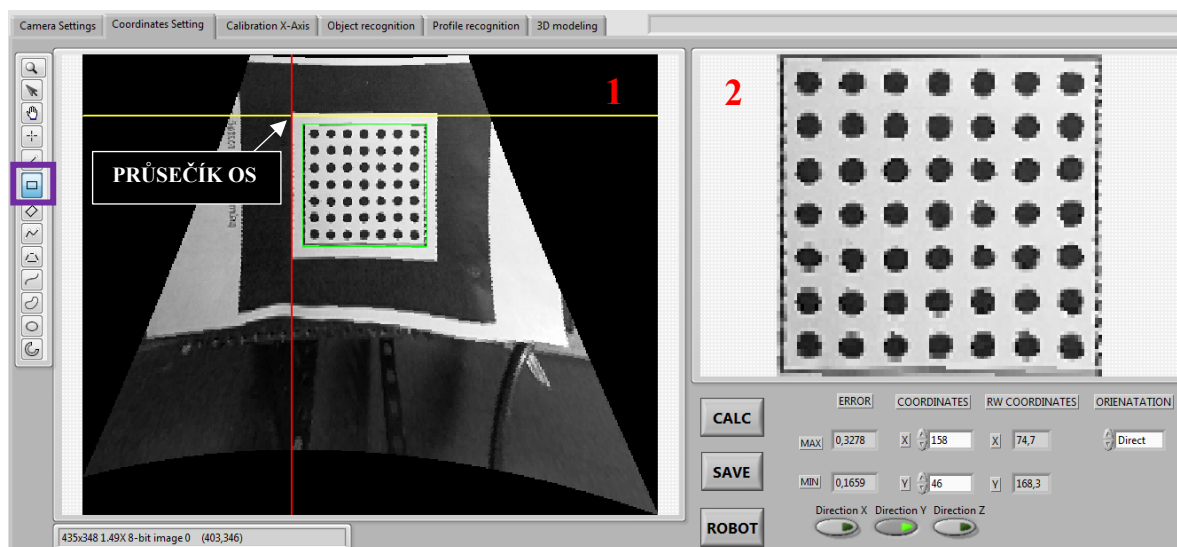


Obr. 52 Grafické znázornění chyb způsobených zkreslením geometrie

Kalibrace probíhá takovým způsobem, že program vypočte optimální délkové rozlišení na jeden pixel ve vertikálním a horizontálním směru, což jsou údaje umístěné pod mapou chyb a značené jako **RESOLUTION** a dopočítá velikost možné chyby, způsobené zkreslením geometrie. Obrázek 52 slouží pro grafické znázornění. V levé části, kde kamera zabírá scénu pod úhlem je plošné rozlišení vypočítané na konstantní délku  $x$ . Pro  $x_1$  platí, že skutečná délka, kterou pokrývá jeden pixel kamery je rovna délce vypočítaného pixelu, proto je v daném místě nulová chyba. Druhý pixel kamery by měl pokrývat vzdálenost  $x_2$ , ale ve skutečnosti má v délce odchylku rovnou  $\Delta x_{2-3}$ . Pro třetí pixel je už odchylka od  $x_3$  dána  $\Delta x_{2-3}$  a  $\Delta x_{3-4}$ , ale v mapě chyb bude zobrazena jen vyšší hodnota tedy  $\Delta x_{3-4}$ . Dá se tedy usoudit že, velikost odchylky se zvětšuje se zvyšujícím se zorným úhlem a že menší chybu bude vykazovat ta geometrie, kde je kamera umístěna ortogonálně vůči měřené rovině (vpravo).

Poslední orientační okno č. 3 slouží k vizuální kontrole provedené kalibrace na něm aplikována kalibrační korekce. Pro rychlou kontrolu může posloužit list milimetrového papíru, který se umístí na kalibrační rovinu a kde jsou případná zkreslení zřetelná ohyby na jinak vůči sobě kolmých a vodorovných přímkách.

## 6.8 Nastavení souřadnicového systému

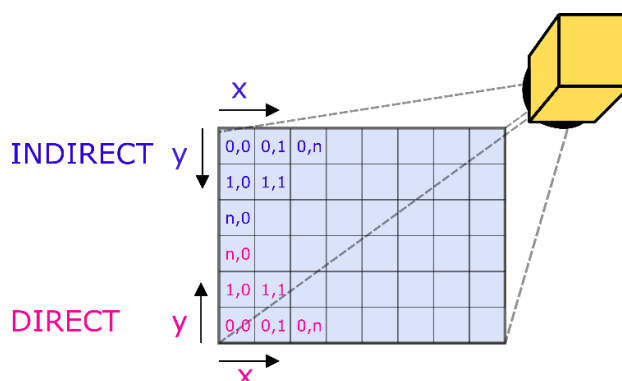


Obr. 53 Uživatelské rozhraní pro kalibraci snímku

Druhá záložka uživatelského prostředí aplikace **Coordinates Settings** slouží k výběru oblasti zájmu, pro určení počátku souřadnicového systému pro kamerový obraz a pro určení počátku souřadnicového systému pro robota.

Výběr oblasti zájmu v okně č.1 je proveden pomocí zeleného obdélníkového specifikátoru a je omezen pouze na ten typ, který nelze rotovat (na obr. 53 označen fialově). Po označení oblasti je pro aplikaci změny nutné zmáčknout tlačítko **CALC** a v okně se aktualizují hodnoty **ERROR MIN** a **ERROR MAX**, které uvádí minimální a maximální velikost lokální chyby způsobené zkreslením geometrie. V kódu je výpočet lokální mapy chyb realizován náhledem do dříve vypočtené mapy chyb celého snímku (obr. 53, okno č. 2) a zaměří se pouze na uživatelem vybranou část, kde vyhledá minimální a maximální hodnotu. V dalších záložkách, kde se obraz jakýmkoliv způsobem zpracovává, se algoritmus vždy soustředí pouze na uživatelem vybranou oblast zájmu a ignoruje její okolí, proto je vhodné ji nastavit tak, aby byla co nejmenší možná a označovala jenom podstatnou část obrazu.

V okně č. 2 je zobrazen detail selektované oblasti.



Obr. 54 Umístění souřadnicového počátku kamery při volbě Direct a Indirect



Pro určení souřadnicového systému kamery jsou určeny kontrolní prvky s označením **COORDINATES X** a **COORDINATES Y**, do kterých se přímo označí ten pixel v okně č. 1, který bude tvořit průsečík souřadnicových os. Ty jsou posléze v okně č. 1 znázorněny žlutou a červenou přímkou. Při určení souřadnicového systému také lze určit, jestli má být počátek souřadnicového systému u levého dolního okraje nebo levého horního okraje obrazu. Změna se provede pomocí přepínače značeného **ORIENTATION**, který zahrnuje možnosti volby **Direct a Indirect**. Na obr. 54 je zobrazeno umístění souřadnicového počátku pro obě volby.



Obr. 55 Pořízený snímek a jeho kalibrovaný obraz při volbě Direct a Indirect

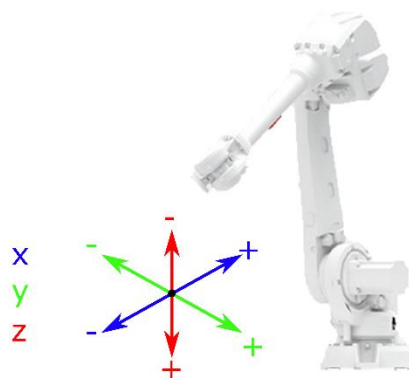
Při práci se snímky LabVIEW vždy adresuje jednotlivé pixely od levého horního okraje, a proto se snímek při volbě možnosti direct zrcadlově otočí, jak je znázorněno na obr. 51. Změna se projeví po zmáčknutí tlačítka **CALC**.

V programu je nastavení souřadnicového systému částí funkce **IMAQSet Calibration Axis Info 2**, která je zahrnuta v kalibračním skriptu, znázorněném v kapitole 6.7.2 na obr. 50. Jednotlivými proměnnými vstupního argumentu **Calibration Axis Info** jsou pozice pixelu tvořícího průsečík souřadnicových os, úhel natočení souřadnicových os a orientace souřadnicového systému.

Posledním nastavením v záložce je nastavení počátku souřadnicového systému robota, které je zapotřebí v kapitole 5.9 pro určení vzdálenosti distančních prvků od referenčního rohu formy. Určení souřadnicového počátku se v uživatelském prostředí zadává vložením souřadnic pixelu, ke kterému se se odečtená vzdálenost bude vztahovat. Zadává se tedy stejným způsobem jako při určení počátku souřadnicového systému kamery, jen s tou změnou, že musí být stisknuto tlačítko **ROBOT**.

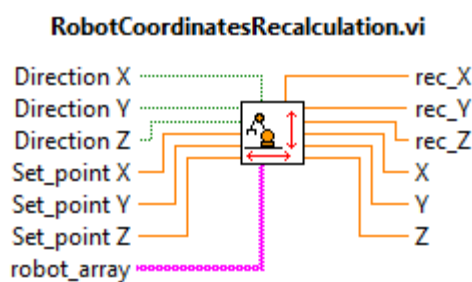
K určení souřadnicového počátku slouží také tlačítka ve spodní části vizualizace, které jsou značeny jako **Direction X**, **Direction Y**, **Direction Z**. Ty slouží k převrácení orientace jednotlivých os. Na obr. 56. jsou znázorněny orientace jednotlivých os v počátečním nezměněném stavu (záleží na nastavení robota), což v případě osy x znamená, že když se rameno bude přibližovat k tělu robota souřadnice budou kladné a zvětšující se. V případě, že je potřeba aby tomu bylo naopak, tedy aby se při přibližování ramena k tělu robota hodnoty snižovali, musí být při nastavení souřadnicového systému zmáčknuto tlačítko **Direction X**. To stejné platí i při nastavení osy Y a Z.





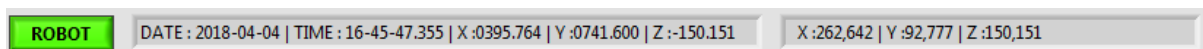
Obr. 56 Souřadnicový systém robota

Přepočet vzdálenosti od souřadnicového počátku je v aplikaci realizováno pomocí funkce **RobotCoordinatesRecalculation**, která se nachází ve smyčce určené pro komunikaci s robotem. Vstupy funkce tvoří pole obsahující aktuální pozici robota, pozice souřadnicového počátku pro všechny 3 osy (Set\_point) a orientace jednotlivých os (Direction). Výstupem funkce jsou původní a přepočítané souřadnice.



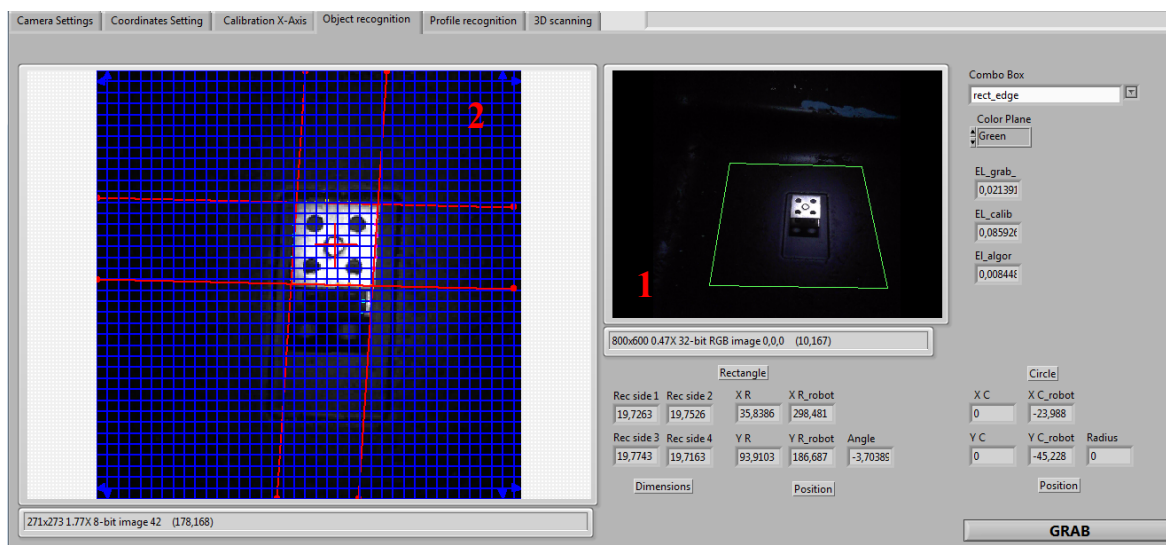
Obr. 57 Funkce pro přepočet vzdálenosti od souřadnicového počátku

Přepočítaná vzdálenost středu ramena robota od souřadnicového počátku je v reálném čase zobrazována v uživatelském prostředí vpravo od dat pořízených z robota. Na obr. 58 je to zobrazeno v pravém poli, kde se z pořízených hodnot dá usoudit, že střed souřadnic byl pozměněn pro osy X a Y. Osa Z byla pouze invertována.



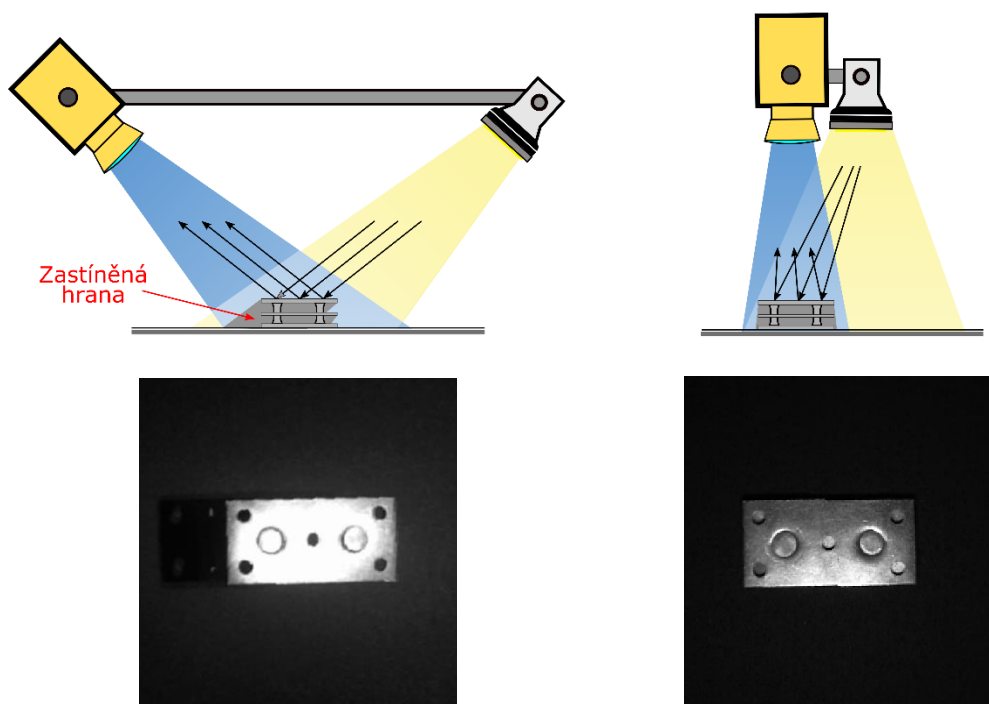
Obr. 58 Indikátor pro zobrazení dat pořízených z robota a přepočítané souřadnice.

## 6.9 Rozpoznání tvaru podložek pomocí konvenčních metod strojového vidění



Obr. 59 Uživatelské rozhraní pro zpracování obrazu konvenční metodou

Čtvrtá záložka **Object recognition** slouží k vizualizaci zpracování obrazu a jeho vyhodnocení pomocí konvenčního přístupu. Tedy takovým způsobem, že se data vyhodnocují z jednoho pořízeného snímku. Výhodou tohoto přístupu je, v porovnáním s aktivní triangulační metodou, rychlost celého procesu.



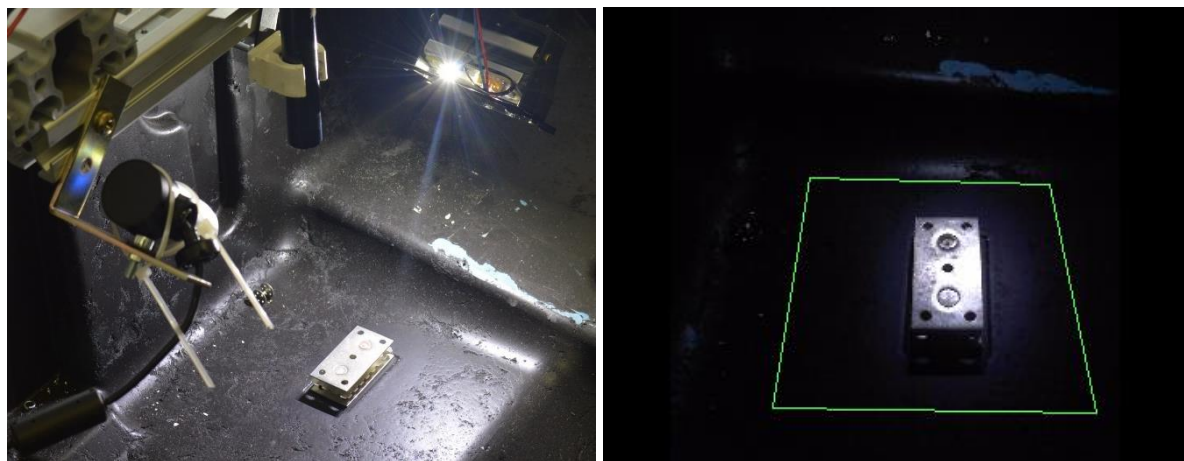
Obr. 60 Vliv zrcadlového a přímého nastavení geometrie na osvětlení kontaktní plochy podložky

Primárním úkolem vývoje této části aplikace bylo nalezení distančních podložek, změření jejich rozměrů, určení úhlu natočení a zjištění jejich pozice vůči počátku souřadnic os robota. Pro správnost vyhodnocení tvaru podložek bylo nutné geometrii scény nastavit tak, aby co nejvíce v obrazu zanikala pro kameru viditelná hrana podstavy (případně středový mezikus) a okolí podložky. Naopak horní část (v kontaktu s jádrem) měla být na pořízeném snímku nejvýraznější. Při testování různých umístění světel i kamery těmto předpokladům nejlépe odpovídalo zrcadlové nastavení geometrie, kdy se od podložky odráželo světlo nejvíce a zároveň byla pro kameru viditelná hrana podstavy dostatečně zastíněná. Uspokojivých výsledků bylo dosaženo i v případě přímého nastavení, které poskytuje větší rozlišení, ale podložky byly na snímku méně kontrastní.

Záložka obsahuje 2 okna, přičemž okno č.1 zobrazuje neupravený obraz pořízený kamerou na kterém je pomocí funkce **IMAQ Overlay Multiple Lines** vymezená oblast zájmu, která byla specifikována během kalibračního procesu. Část obrazu, která se nenachází v oblasti zájmu bude v dalším zpracování ignorována. V okně č. 2 obrázku je znázorněn obraz, který byl zkalibrován a byli na něm aplikovány veškeré úpravy a zpracování. Uživatel tak má možnost vizuálně ověřit funkci algoritmu. V pravém horním rohu uživatelského prostředí je umístěn **Combo Box**, sloužící pro přepnutí mezi algoritmem pro hledání kvádrovitých podložek, nazvaným **Rect\_Edge** a algoritmem pro hledání válcovitých podložek **Circle**.

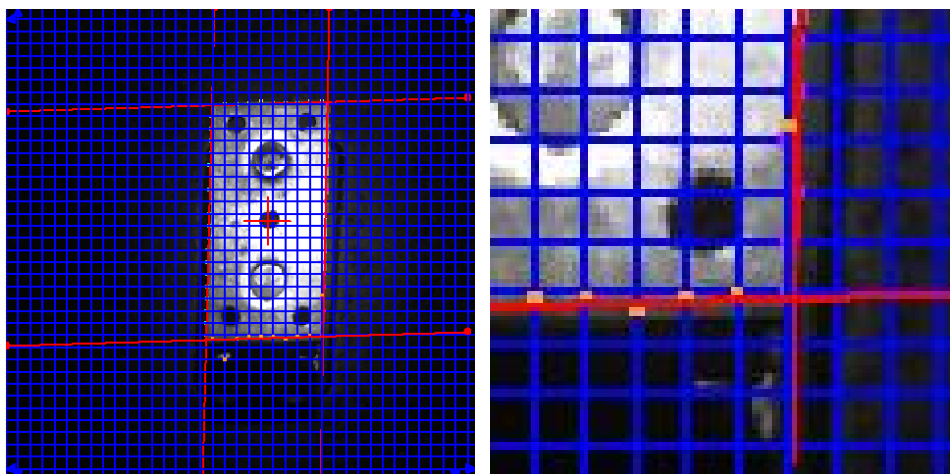
Pro oba algoritmy jsou v uživatelském prostředí společné následující indikátory: **EL\_grab** zobrazující dobu pořízení snímku z kamery, **EL\_calib** udávající dobu provedení kalibrace a **EL\_algor** zobrazující dobu trvání zpracování obrazu a jeho vyhodnocení. Časy zobrazené v indikátorech jsou udávány v sekundách.

### 6.9.1 Identifikace kvádrovitých podložek



*Obr. 61 Vlevo fotografie měřené scény při inspekci kvádrovité podložky, vpravo pohled kamery s rozlišením 800x600 pixelů*

Obr. 61 zachycuje scénu, jejíž vyhodnocení je v další části rozebíráno. Vlevo je zobrazeno, jak scénu vidí člověk a vpravo je zobrazeno, jak scénu při daném nastavení vnímá kamera. Na první pohled zřetelné je, že vliv okolního parazitního světla je při daném nastavení zanedbatelný. Oblast, která byla dostatečně nasvícena LED panelem pokrývala plochu o přibližných rozměrech 8 x 7 cm.



Obr. 62 Kalibrovaná oblast zájmu s nalezenou kvádritou podložkou. Vpravo je zobrazen detail na pravý dolní roh podložky.

Na obr. 62 je vlevo znázorněný obraz zachycující nelezení distančního prvku. Obraz je v této fázi zkalibrován a ořezán pouze na oblast zájmu, která v tomto případě činí 270 x 270 pixelů. V první fázi se při hledání komponentu aplikují funkce **IMAQ Find Edge** pro lokalizaci hran a jejich přímkovou aproximaci, která je v okně prezentována červenou barvou.

Funkce **IMAQ Find Edge** obsahuje řadu jednotlivých hranových lokálních detektorů, které jsou v obrázku č. 62 značeny modrými liniemi.

Funkce jednotlivých hranových bodových detektorů je znázorněna na obr. 63 kde je zobrazen detail jediného zpracovaného profilu z prostředí Vision Assistant. Uvedený profil je získán kombinací několika kroků, přičemž základní tvar vypočtené křivky udává derivace původního profilu. V nastavení hranového detektoru lze určit velikost jádra, tedy množství pixelů, které je před derivací průměrováno. Zvětšení velikosti jádra bude mít na výsledný profil podobný dopad jako aplikace nízkofrekvenčního filtru. Dalšími argumenty funkce je typ hledané hrany, kde je na výběr buď nástupná, sestupná nebo první nalezená. Posledním klíčovým parametrem je nastavení tvrdosti hrany, což je hodnota prezentující prahy, které jsou v obrázku č. 63 vizualizovány pomocí modrých linií. Hrany ležící v oblasti mezi prahy budou při výběru ignorovány.



Obr. 63 Hranový bodový detektor.

Výstupem jednotlivých hranových detektorů je pouze 1 bod. V pravé části obrázku 58 jsou jednotlivé lokální detekce při dostatečném přiblížení na modrých liniích prezentované pomocí malých barevných čtverců. Algoritmus funkce **IMAQ Find Edge** zpracovává obraz pouze v jednom směru, kde vyhledá body jednotlivých lokálních detektorů a poté z jejich pozice pomocí bilineární transformace aproximuje přímkou ležící na jedné z hran podložky.

Vzhledem k faktu, že funkce **IMAQ Lines Intersection** může nacházet hranu pouze v jednom směru, bylo pro nalezení čtyř stran podložky zapotřebí použít funkce čtyři. Bodové značení pro nalezené lokální hrany mají ve vizualizaci pro každý směr jiné zabarvení.

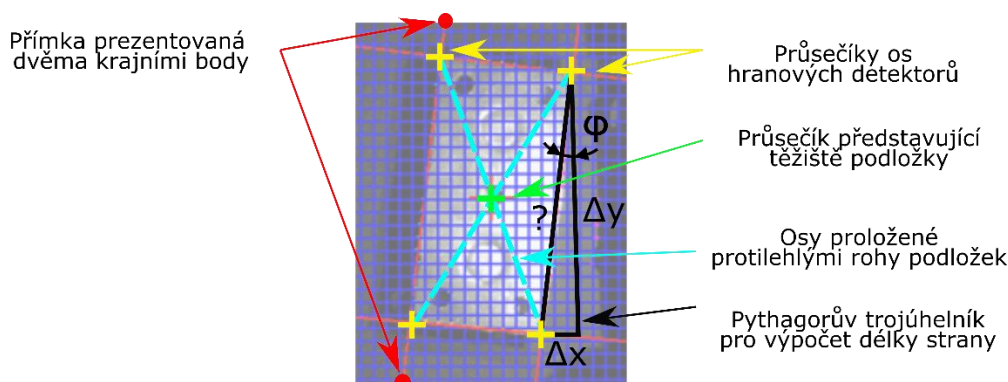
Tab. 12 Zabarvení lokálních hranových detektorů pro různé směry hledání hrany.

Směr hledání strany	Barva
Shora dolů ▼	Žlutá
Ze spodu nahoru ▲	Modrá
Zleva do prava ►	Fialová
Zprava do leva ◄	Oranžová

Výstupem funkce **IMAQ Lines Intersection** jsou tedy 4 přímky, a každá z nich je prezentována 2 body ležícími v protilehlých pozicích na kraji obrazu. K nalezení jednotlivých rohů podložek je zapotřebí najít jejich průsečíky, což je v kódu řešeno pomocí funkce **IMAQ Lines Intersection**, jejíž argumenty jsou dvě přímky, prezentované právě dvěma body. Výstupem funkce jsou souřadnice pixelu, jenž leží na průsečíku přímek.

Po získání všech 4 průsečíků, které prezentují rohy podložky lze určit délky jednotlivých stran takovým způsobem, že se jejich souřadnice v obraze pomocí funkce **IMAQ Convert Pixel to Real World** převedou na souřadnice bodů ve skutečných délkových mírách, podle kterých se pomocí Pythagorovy věty určí jejich vzdálenost, případně úhel natočení pomocí goniometrických funkcí.

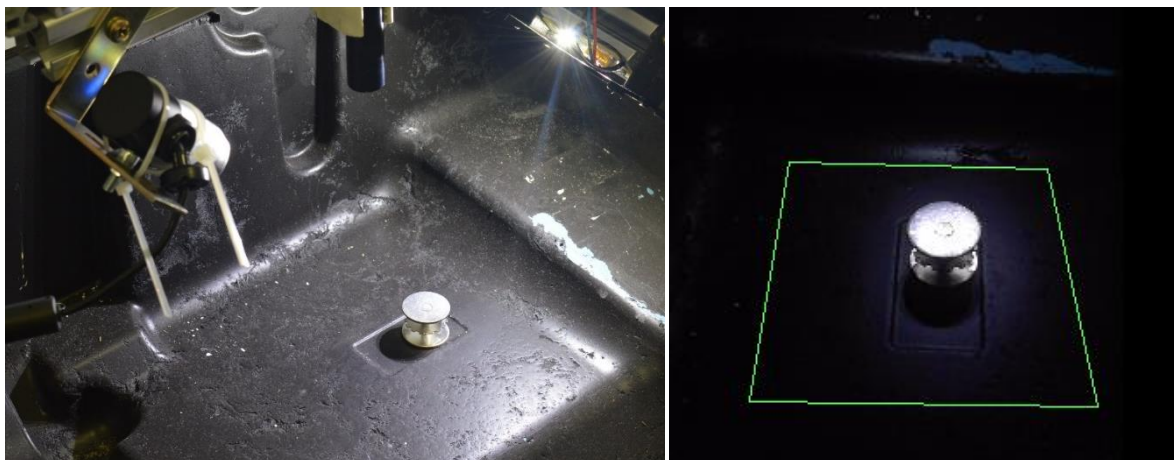
Střed podložky je vypočítán jako průsečík dvou přímek, které byly proloženy protilehlými rohy.



Obr. 64 Znáznornění vazeb vedoucích k výpočtu stran podložek a určení jejich těžiště

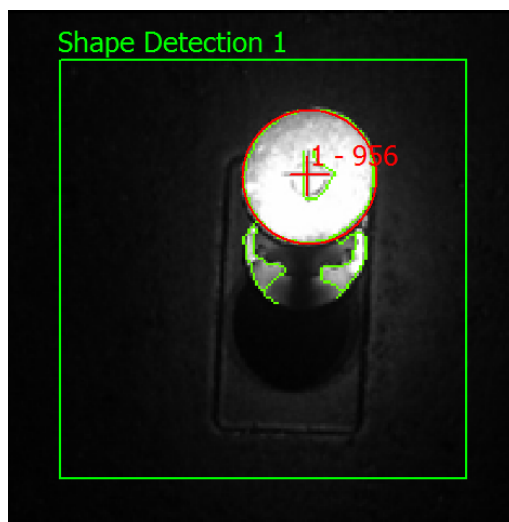
Výsledky měření jsou pro inspekci kvádrů v uživatelském prostředí uvedené pod sekci **Rectangle**, kde ukazatelé **Rec\_side** uvádějí délky jednotlivých stran v jednotce míry. Indikátory **X\_R**, **Y\_R**, **X\_R\_robot**, **Y\_R\_robot** zobrazují vzdálenost od souřadnicového počátku kamery a robota. Poslední indikátor **Angle** ukazuje natočení podložky ve stupních.

### 6.9.2 Identifikace válcovitých podložek



Obr. 65 Vlevo fotografie měřené scény při inspekci válcovité podložky, vpravo pohled kamery s rozlišením 800x600 pixelů

Řešení pro nalezení válcovitých podložek je téměř shodné s řešením pro nalezení kvádrovitých podložek, jen s tím rozdílem, že pro nalezení kontaktní plochy byla využita funkce pro nalezení kružnic **IMAQ Detect Shapes**, jenž je založena na Houghově rychlé transformaci. V první fázi si funkce pomocí hranového detektoru vyhledá v oblasti zájmu kontury, přičemž v jejím nastavení se zadává velikost úrovně prahu pro selekci strmých hran a také se dá specifikovat v jakém rozmezí pixelů se průměr hledaných kružnic bude nacházet. Falešné nálezy lze eliminovat vhodným nastavením požadované minimální shody mezi aproximovanou a skutečnou kružnicí, která se pohybuje v rozmezí 0 – 1000. Zde vyšší hodnota prezentuje větší shodu.

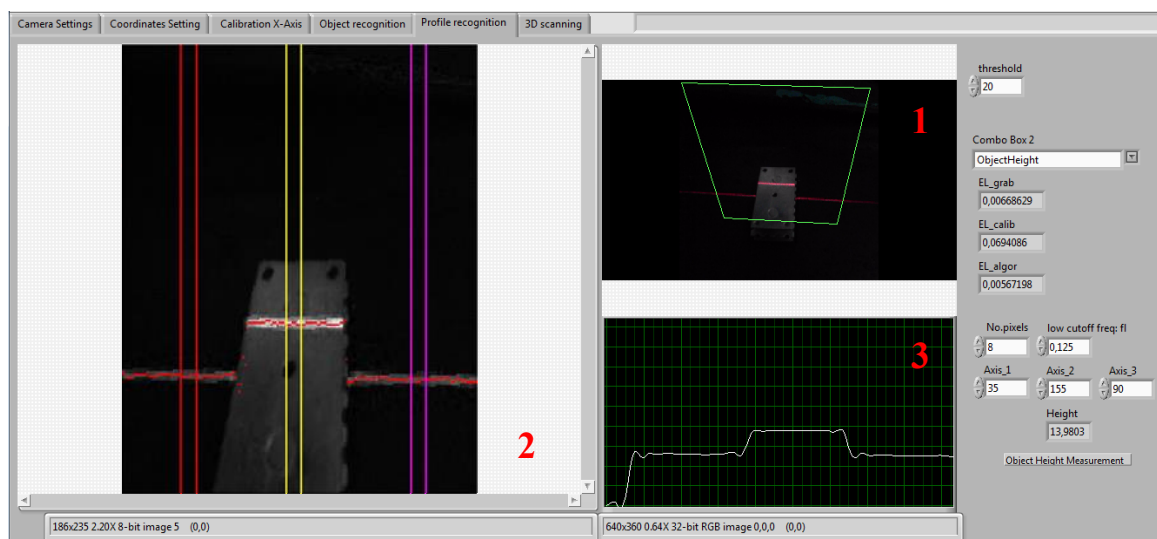


Obr. 66 Kalibrovaná oblast zájmu s nalezenou kvádrovitou podložkou

Výsledky měření jsou pro inspekci válců v uživatelském prostředí uvedené pod sekci **Circle**, kde ukazatel **Radius** uvádí velikost poloměru v milimetrech a indikátory **X\_C**, **Y\_C**, **X\_C\_robot**, **Y\_C\_robot** zobrazují vzdálenost od souřadnicového počátku kamery a robota v milimetrech.



## 6.10 Algoritmus pro vyhodnocení profilu aktivní triangulační metodou – Kamera 1

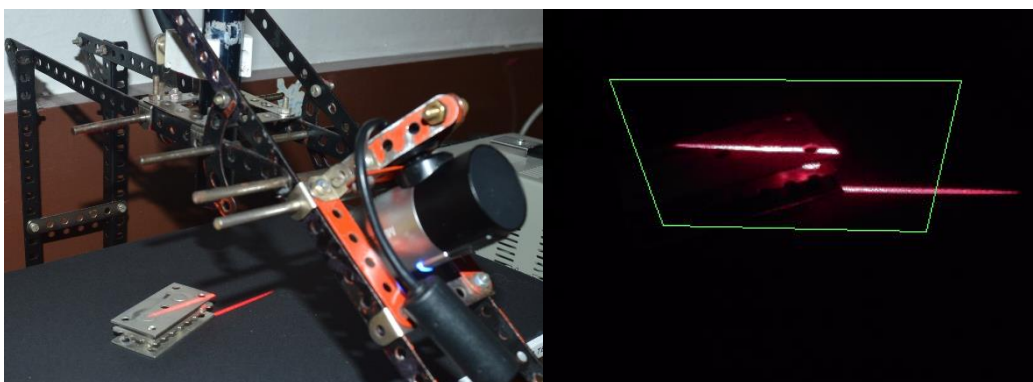


Obr. 67 Uživatelské rozhraní pro zpracování obrazu pomocí aktivní triangulační metody

Pátá záložka **Profile recognition** slouží k vizualizaci zpracování obrazu a vyhodnocení výškového profilu objektů pomocí aktivní triangulační metody.

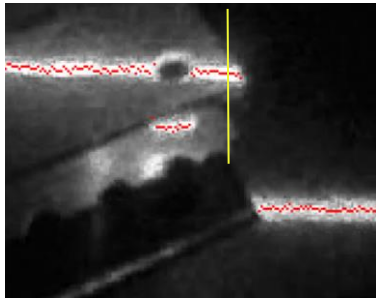

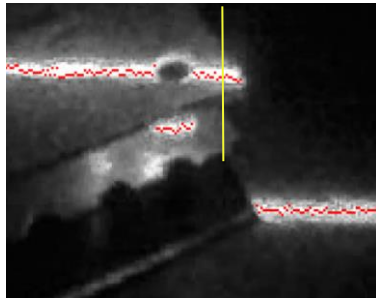
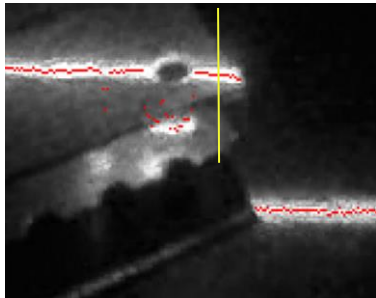
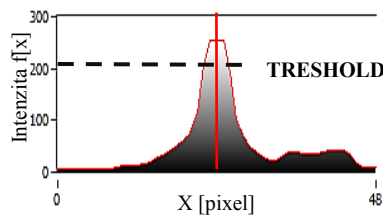
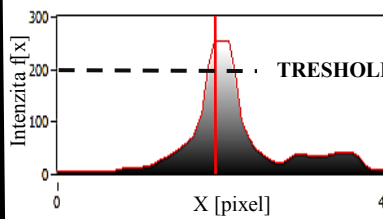
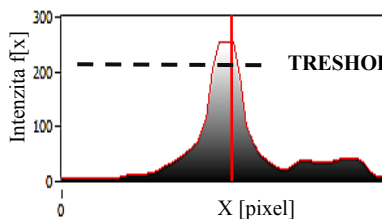
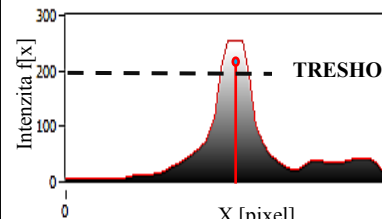
V uživatelském rozhraní je obsluze umožněno testování čtyř algoritmů pro nalezení laserové stopy a jeden algoritmus pro určení výšky měřeného předmětu. Jednotlivé módy lze přepínat pomocí **Combo Box** a mají společný ovládací prvek **Threshold**, určující velikost prahu, určujícího intenzitu pod kterou budou pixely pro výpočet pozice laserového svazku ignorovány. Indikátory společné pro všechny algoritmy mají tuto funkci: **EL\_grab** zobrazující dobu pořízení snímku z kamery, **EL\_calib** udávající dobu provedení kalibrace a **EL\_algor** zobrazující dobu zpracování obrazu a jeho vyhodnocení. Časy zobrazené v indikátorech jsou udávány v sekundách.

Obr. 68 zobrazena scéna, jenž posloužila pro ukázkou funkce a popisu jednotlivých algoritmů hledajících laserovou stopu. Jejich výčet je zobrazen v Tab. 13.



Obr. 68 Vlevo fotografie měřené scény při testu funkce algoritmů hledajících laserovou stopu, vpravo pohled kamery s rozlišením 800x600 pixelů

Tab. 13 Aplikovatelné algoritmy pro nalezení laserové stopy.

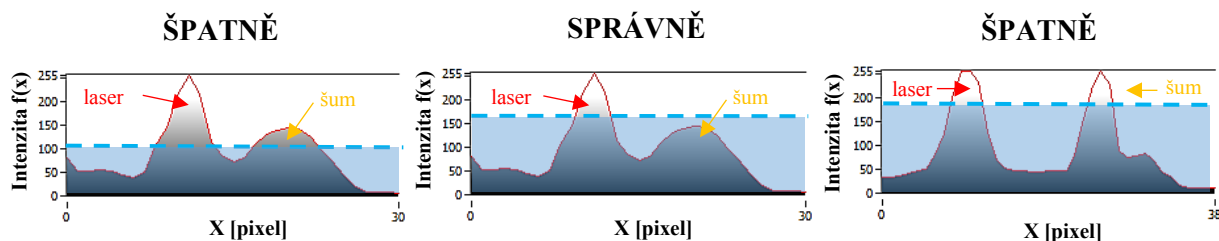
MAX_CENTER	MAX_TOP	MAX_BOTTOM	COG
			
			
$MAX\_C = \frac{\sum_i ((f(x)) \wedge \max(x))}{i}$	<i>První pixel s maximální intenzitou</i>	<i>Poslední pixel s maximální intenzitou</i>	$COG = \frac{\sum_i (x \cdot f(x))}{\sum_i (f(x))}$



V tab. 13 jsou v prvním řádku jednotlivé algoritmy pojmenovány tak, jak je lze nalézt v roletovém menu v programu. V druhém řádku tabulky je výřez zpracovaného obrazu, přičemž červené pixely znázorňují místo, které bylo v daném řádku vyhodnoceno jako laserová stopa. Žluté úsečky pak ukazují na profil, který byl pro demonstraci detailněji zobrazen v grafu na třetím řádku, kde je výsledný nalezený bod zvýrazněn červenou vertikálou. Matematický či slovní popis pro vyhodnocení výsledného bodu v jednom sloupci obrazu je uveden na posledním řádku tabulky.

Kamera na obr. 68 měla při pořízení snímku moc dlouhou expoziční dobu (nebo výkonný laser), protože si lze na jednotlivých profilech všimnout, že intenzity bodů kolem středu paprsku dosáhli saturace. V ideálním případě by měla být scéna nastavena tak, aby laserová stopa v profilu měla přibližně tvar Gaussovy křivky a aby byla na pořízeném snímku výrazná pouze laserová linie, ovšem při takovém nastavení by nebyl zřetelný rozdíl mezi algoritmy **MAX\_CENTER**, **MAX\_BOTTOM** a **MAX\_TOP**. Všechny tyto algoritmy pracují pouze s těmi body, které mají v profilu nejvyšší intenzitu. V případě **MAX\_BOTTOM** a **MAX\_TOP** se jedná o ten bod s nejvyšší intenzitou, který je nejblíže k vrchnímu nebo k dolnímu okraji snímku. Tyto dva algoritmy jsou pro nasazení vhodné pouze v případě, že je kamera umístěna ortogonálně vůči měřenému předmětu, na který laser svítí ze strany (běžná geometrie). Algoritmus **MAX\_CENTER** průměruje pozici všech bodů s nejvyšší intenzitou a je z uvedených možností nejuniverzálnějším a nejrobustnějším algoritmem pro vyhledání laserové stopy v případě inverzní běžné geometrie. Posledním uvedeným algoritmem je **COG** (Center Of Gravity), který střed laserové stopy určí pomocí nalezení těžiště v profilu. Ze všech implementovaných algoritmů je **COG** nejvíce náchylné k milnému odečtení stopy kvůli okolnímu šumu či parazitnímu osvětlení. Na druhou stranu za ideálních podmínek, bude algoritmus vyhodnocovat stopu nej přesněji.

Pro správnou funkci algoritmů je také důležité správné nastavení velikosti prahu pomocí ovládacího prvku **THRESHOLD**. K příkladnému znázornění slouží obrázek č. 69, kde jsou zobrazeny profily a možné nastávající situace. V případě levého obrázku je práh nastaven na nízkou hodnotu a při aplikaci algoritmu **COG** bude mít přecházející šum vliv na pozici nalezeného bodu. Zbylé algoritmy výslednou laserovou stopu vyhodnotí správně. Prostřední obrázek zobrazuje ideální nastavení prahu, protože veškerý šum je při výpočtu potlačen a všechny algoritmy vyhodnotí správný bod spolehlivě s tím, že nej přesnější výsledek bude vykazovat algoritmus **COG**. Pravý obrázek prezentuje situaci, kde nastavení prahu nebude mít vliv na správnost výsledku. Jedná se o špatné nastavení scény, kdy je nutné snížit expoziční čas a zvýšit výkon laseru tak aby byl výškový rozdíl mezi šumem a laserovým paprskem rozpoznatelný. Pokud to udělat nelze bude výsledek měření milný, protože program neobsahuje žádný algoritmus predikující umístění stopy v obraze.

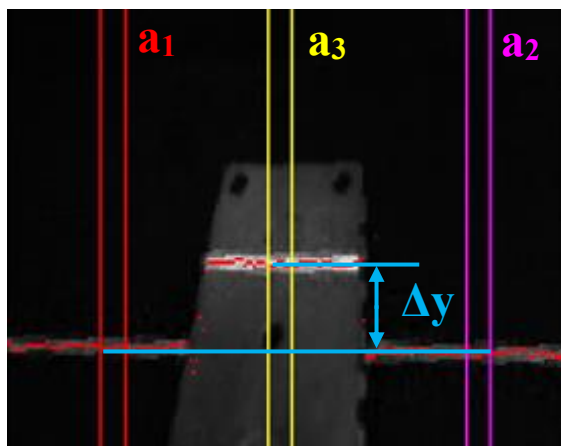


Obr. 69 Ukázky špatného a správného nastavení prahu pro hledání laserové stopy.

Na obr. 67 si lze všimnout, že se uživateli zobrazují 3 pracovní okna. V okně č. 1 se uživateli podobně jako v přechozích případech zobrazuje neupravený kamerou pořízený obraz se zvýrazněnou oblastí zájmu. V okně č. 2 je znázorněn obraz, který byl zkalibrován a byli na něm aplikovány veškeré úpravy a zpracování. Uživatel tak má možnost vizuálně ověřit funkci jednotlivých algoritmů pro vyhledání stopy, nebo pro změření výšky předmětu. V grafu, který je zobrazen pod číslem 3 je pro lepší orientaci znázorněn výsledný zpracovaný profil.

Algoritmus pro měření výšky předmětů byl stavěn na vyhledávání stopy pomocí metody **MAX\_CENTER** a nelze přepnout. Je tomu z toho důvodu, že finální testy byly provedeny na inverzní běžné geometrii, pro kterou měla metoda **MAX\_CENTER** nejlepší výsledky (**COG** nebylo vhodné použít kvůli velkému množství šumu).

Pro měření výšky předmětu slouží všechny ty ovládací prvky, které v uživatelském rozhraní náleží pod skupinu **Object Height Measurement**. Jediným předzpracováním extrahovaného výškového profilu je filtrace nízkých frekvencí pomocí **FIR** filtru (dolní propust) pro potlačení šumu. Hodnota mezní frekvence je v uživatelském prostředí zadávána pomocí ovládacího prvku **Low Cutoff Freq.** Filtrovaný profil je zobrazen v grafu, jenž je v uživatelském okně označen číslem 3. Samotný algoritmus pak funguje na takovém principu, že se zaměří na tři uživatelem definované oblasti, ve kterých výšku všech obsažených bodů převede do mírových jednotek. V dalším kroku je vypočtena průměrná hodnota jednotlivých oblastí. Na obr. 70 jsou oblasti označeny barevnými vertikálami a číselným označením. Při výpočtu výšky oblasti se nejdříve průměrují hodnoty oblasti  $a_1$  a  $a_2$ . Finální hodnotu dává rozdíl mezi oblastmi  $a_{1,2}$  a  $a_3$ .

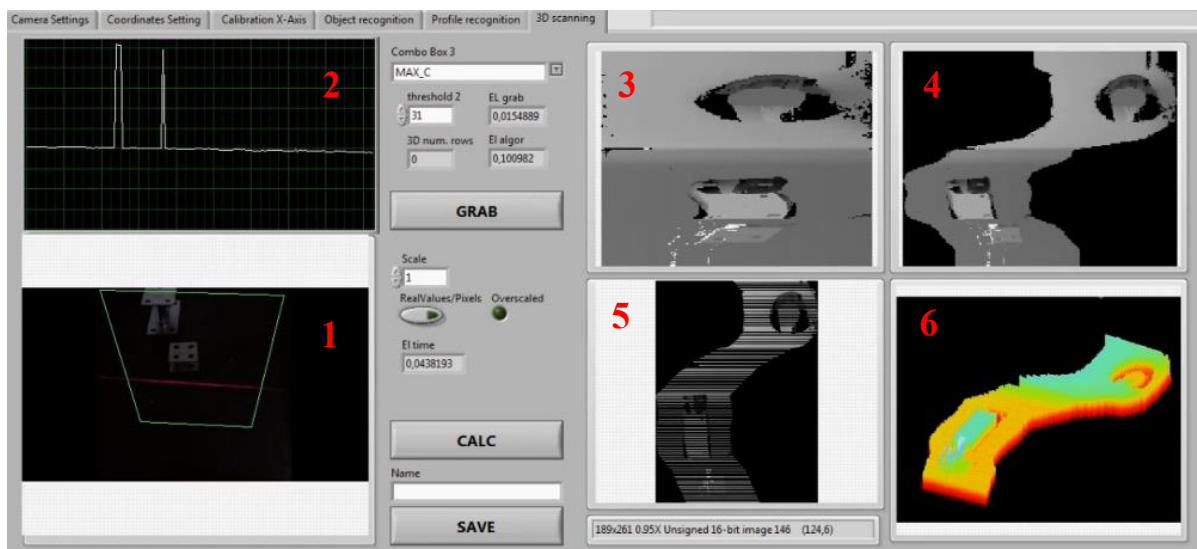


Obr. 70 Kalibrovaná oblast zájmu s demonstrací výpočtu výšky předmětu

$$\Delta y = \left| \left( \bar{X}_{a_3} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right) - \left( \frac{\left( \bar{X}_{a_1} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right) + \left( \bar{X}_{a_2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right)}{2} \right) \right| \quad (11)$$

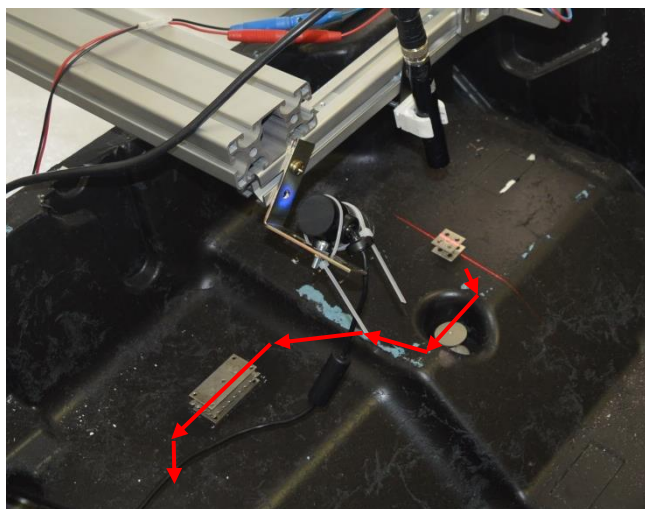
Při testování algoritmu lze v uživatelském menu určit šířku jednotlivých oblast pomocí **No. Pixel.** a jejich pozici pomocí **Axis\_1, Axis\_2, Axis\_3** kde zadaná hodnota prezentuje řádek, tvořící střed jednotlivých oblastí.

## 6.11 Vytvoření výškové mapy – Kamera 1



*Obr. 71 Uživatelské rozhraní pro vytvoření výškové mapy*

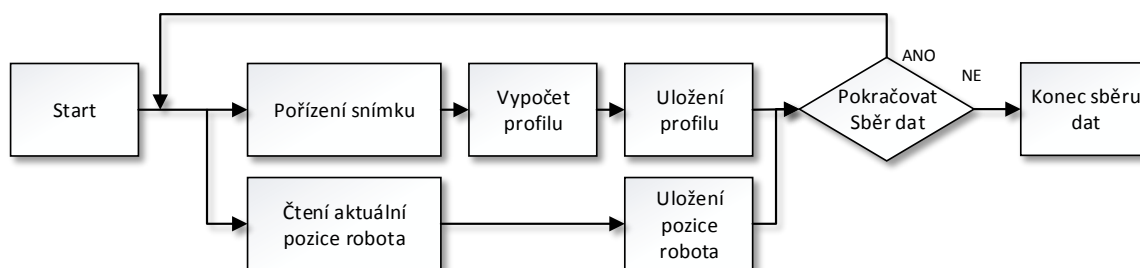
Poslední záložka aplikace **3D scanning** slouží pro vytvoření výškové mapy formy. Ta je vytvořena takovým způsobem, že v reálném čase kontinuálně program vyhodnocuje profily z jednotlivých snímků pomocí algoritmů uvedených v kapitole 6.10 a paralelně k tomu je průběžně ukládána pozice robotické paže. Po dokončení skenovacího procesu se uložená výšková mapa zpracuje tak, aby byl kompenzován pohyb robotické paže a jednotlivé osy byly škálovány do uživatelem předvolených délkových mír.



*Obr. 72 Fotografie měřené scény se znázorněnou trajektorií pohybu robota*

Uživatelské prostředí obsahuje 6 oken, přičemž trvale aktivní je okno č. 1, zachycující obraz z kamery se zdůrazněnou oblastí zájmu, a okno č. 2 zobrazující aktuálně vypočítaný profil. Tyto dvě

okna slouží obsluze pro vizuální kontrolu procesu během sběru dat. Kontrolní prvky **Combo Box a Threshold** spolu s indikátory **EL\_grab** a **EL\_algor** slouží pro nastavení a zobrazení parametrů pro výpočet jednotlivých profilů a jejich funkce je identická s těmi, které byly popsány v kapitole 6.10. Nový indikátor **3D\_num\_rows** zobrazuje počet naměřených profilů, ze kterých bude finální výšková mapa počítána.

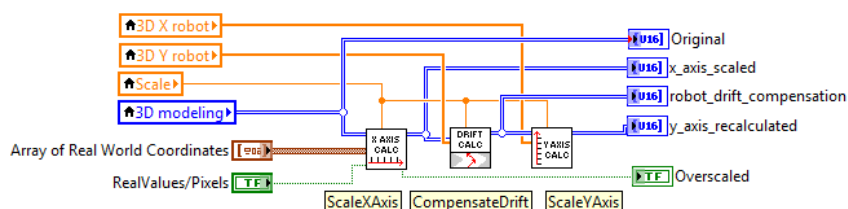


Obr. 73 Algoritmus jednotlivých úkonů při kontinuálním sběru dat pro pořízení výškové mapy

Proces kontinuálního sběru dat začíná stisknutím tlačítka **Grab**, jehož opětovné stlačení proces také ukončí. Jednotlivé kroky algoritmu jsou znázorněny na obr. 73.

Po ukončení sběru dat, je nutné nastavit parametry pro samotný výpočet výškové mapy. K tomu slouží dva ovládací prvky. První je **Scale**, kterým se nastavuje délka ve skutečných mírách, kterou bude ve vypočtené výškové mapě pokrývat jeden pixel. To jak v horizontálním, tak vertikálním směru. Druhým ovládacím prvkem **RealValues/Pixels** se určuje, zdali bude výška jednotlivých bodů prezentována ve skutečných délkových mírách, nebo v pixelech. Výšková mapa, která je ve skutečných délkových mírách je tvořena polem hodnot datového typu double. Výšková mapa vyjádřená v pixelech je tvořena polem hodnot s 16. bitovým bezznaménkovým integerem. Pro další zpracování mapy pomocí funkcí LabVIEW je vhodné zvolit variantu s pixely, protože formát je kompatibilní s funkcemi pro zpracování obrazu. Pro výpočet jsou v uživatelském prostředí indikátory dva. První uvedený **Overscaled** uživatele informuje, jestli snímek nebyl škálován na moc jemné rozlišení. Tedy zdali je v dané ose hodnot naměřených méně než výsledné rozlišení. Druhý indikátor **EL\_time** zobrazuje dobu výpočtu výškové mapy. Výpočet je proveden po stisku tlačítka **CALC**.

Ve spodní části uživatelského prostředí je možné si výsledný výškový profil uložit pomocí tlačítka **SAVE** do nekomprimovaného formátu TIF. Jméno uloženého souboru bude začínat názvem, vepsaným do kolonky **Name** a bude k němu přiloženo datum a čas uložení. Výsledný formát může mít takovýto tvar: image1\_2018-04-20-14-29-22.tif (Jméno\_RRRR\_MM\_DD\_hh\_mm\_ss.tif).

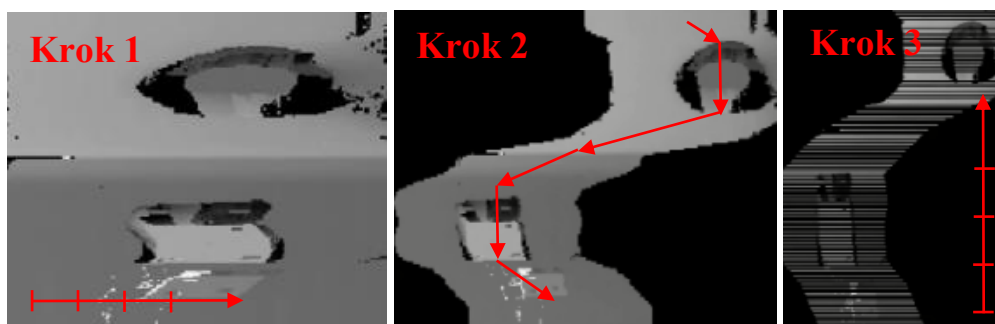


Obr. 74 Zjednodušený kód pro přepočtení výškové mapy

Jednotlivé kroky přepočtu jsou prováděny v následujícím pořadí. Nejdříve se na požadovaný délkový rozměr škálují jednotlivé extrahované profily, které v obraze prezentují osu x. Tento krok je realizován pomocí funkce **ScaleAxisCalc** a jeho průběh není zobrazen ve vizualizaci.

V druhém kroku se ve výškové mapě kompenzuje pohyb robota v té ose, na které leží profil. Ve vizualizaci, okně č. 4 je to znázorněno na ose x a v kódu je krok proveden pomocí funkce **CompensateDrift**. Na uvedeném snímku je zřetelné, že body, které nemohli být naměřeny kvůli omezenému zornému poli, jsou nahrazeny nulovou hodnotou.

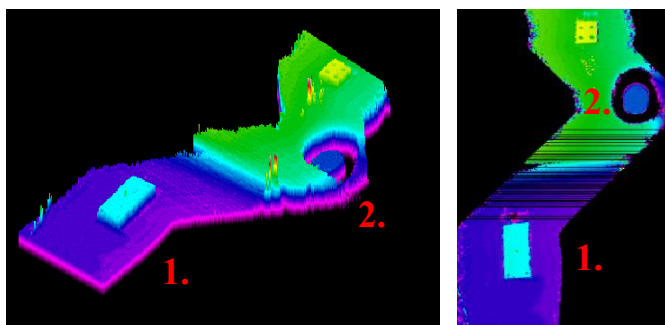
Posledním konečným krokem úpravy snímku je škálování obrazu ve směru pohybu kolmém vůči profilu, jenž je v okně vizualizace prezentován osou y. Výstup funkce je finální škálovaná výšková mapa, která je zobrazena jak v dvoudimenzionálním podání v okně č. 5, tak v prostorovém podání v okně 6. Na obrázku z poslední fáze si lze všimnout, že vypočítaný obraz obsahuje prázdné řádky. To je způsobeno rychlým pohybem robota, kdy nebyl nasbírán dostatečný počet profilů. Tento jev lze omezit pomalejším pohybem robotické paže, použitím vhodné filtrace, nebo hrubějším škálováním obrazu.



*Obr. 75 Jednotlivé kroky úpravy výškové mapy.*

## 6.12 Vyhodnocení výškové mapy

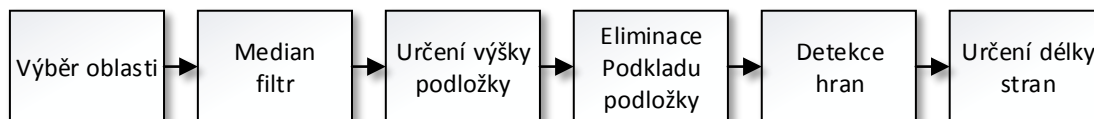
Po pořízení výškové mapy je důležité data zpracovat takovým způsobem, aby bylo možné z nich vyhodnotit žádané informace. V následujících dvou podkapitolách bude vysvětleno možné řešení pro nalezení válcovitých i kvádrovitých podložek. Celý postup je vyzkoušen a aplikován v programu Vision Assistant 2017. Výšková mapa, která je k demonstraci použita vychází z trajektorie robota, jenž je znázorněná na obr. 72 Mapa je škálována do rozlišení 1 pixel = 1mm.



*Obr. 76 Výšková mapa sloužící k popisu algoritmu pro hledání válcovitých a kvádrovitých podložek*

Na obr. 76 označuje pozice č. 1 místo, které bude popsáno u algoritmu hledajícího kvádrovité podložky a místo č. 2 u algoritmu hledajícího válcovité podložky.

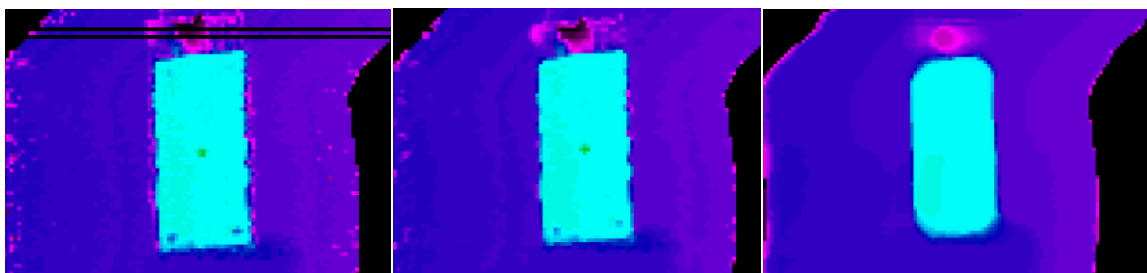
### 6.12.1 Vyhodnocení výškové mapy za účelem měření rozměrů kvádrovitých podložek



Obr. 77 Sekvence pro zpracování výškové mapy za účelem měření délky stran kvádrovité podložky.

Na obr. 77 je znázorněn skript vedoucí k měření stran kvádrovitých podložek. Prvním krokem je výřez oblasti, kde by se měl nacházet střed zájmu. Oblast by měla být co nejmenší možná, protože čím oblast je větší, tím je delší čas jejího zpracování a větší pravděpodobnost výskytu šumu.

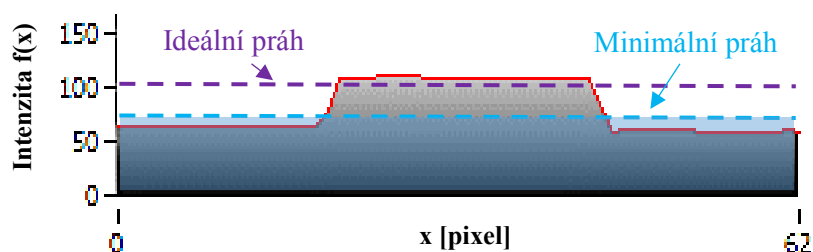
V druhém kroku je vhodné obraz zpracovat filtrem propouštějícím nízké frekvence. Důvod je potlačení vysokofrekvenčního nežádoucího šumu a také “doplnění” těch řádků, které neobsahují žádný profil kvůli rychlému přejezdu robota. Ve skriptu je využit **Median Filtr**, jenž byl nastaven na velikost 2x2. V případě zvětšování jádra filtru bude obraz uhlazenější, ovšem budou se kulatit i hrany podložky, které jsou důležité pro určení jejího rozměru.



Obr. 78 Ukázka nefiltrovaného obrazu, obrazu s aplikovaným filtrem o velikosti 2x2 a obrazu s aplikovaným filtrem o velikosti 10x10

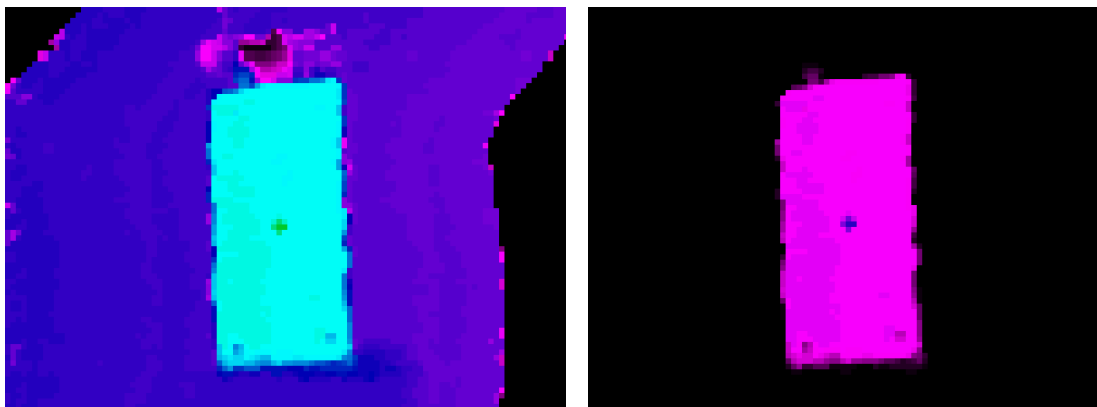
V dalším kroku se určí výška podložky, což bylo popsáno v kapitole 6.10. V případě, že není k dispozici mapa s výškou v reálných délkových mírách, je vhodné nejdříve průměrovat a odečíst pixely v jednotlivých oblastech tak, jak je to uvedeno v kapitole 6.10 a výsledný výškový rozdíl  $\Delta y$  vynásobit vertikálním rozlišením, které je uvedeno v záložce aplikace **Calibration X-axis**.

Po získání výšky objektu se v dalším kroku eliminuje vliv podkladu, tím způsobem, že se od celého obrazu odečte hodnota vyšší jako je výška podkladu. Nejlépe hodnota, ležící pod horním okrajem podložky. Jak je znázorněno na obr. 79.



Obr. 79 Ukázka volby ideálního prahu pro eliminaci podkladu

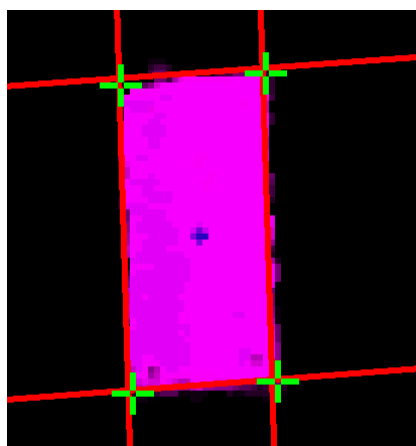




*Obr. 80 Před a po odstranění podkladu*

Výsledkem odečtení podkladu je, že pokud v okolí nejsou žádné předměty vysoké alespoň stejně jako podložka, zůstane podložka v obraze jako jediná, což je ideální případ pro další krok.

V posledním kroku se opakuje stejný postup jako při hledání kvádrovitých podložek pomocí konvenčního přístupu popsaného v kapitole 6.9.1. Na obraz se aplikují z každé strany hranové detektory, které jednotlivé lokální hranové detektory interpolují přímkou. Průsečíky všech čtyř přímek značí jednotlivé rohy podložky, podle jejichž pozice lze pomocí Pythagorovy věty dopočítat délku stran podložky. Jediný rozdíl oproti dříve uvedenému řešení je v tom, že výslednou hodnotou není délka v mm, ale počet pixelů, který se musí vynásobit hodnotou, na kterou se obraz škáloval. V tomto případě 1 mm.



*Obr. 81 Výsledný zpracovaný obraz se zobrazenými průsečíky, značícími rohy podložky*

Délky jednotlivých stran z obr. 81 byly vypočteny na: 51,32; 24,29; 51,37; 23,91 a tedy nejvyšší odchylku tvoří třetí zmíněná strana a to 1,37 mm, což je nedostatečné rozlišení. Pro dosažení přesnějších výsledků je vhodné obraz škálovat na menší hodnoty.

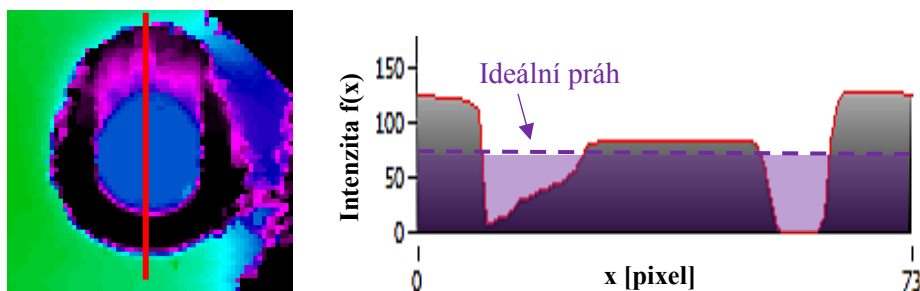
### 6.12.2 Vyhodnocení výškové mapy za účelem měření rozměrů válcovitých podložek



*Obr 82 Sekvence pro zpracování výškové mapy za účelem měření průměru válcovité podložky*

Sekvence pro vyhodnocení válcovitých podložek je ve většině kroků identická se sekvencí pro vyhodnocení kvádrovitých podložek. Změna nastane v kroku, kdy se má změřit výška podložky, protože v případě, že je podložka umístěná v díře, kamera přes hranu díry nemusí vidět laserový paprsek na dně. V tomto případě je nutné si referenční výšku určit od nějaké jiné okolní roviny a experimentálně si zkalibrovat měření výšky pro všechny podložky.

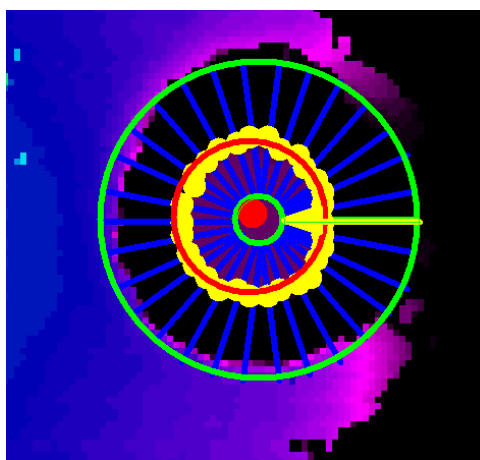
V každém případě po experimentálním určení výšky je v dalším kroku pro vyhodnocení průměru podložky vhodné opět eliminovat přebytečné vrstvy. Kromě podkladu může být algoritmus ovlivněn i například šumem způsobeným odrazem laseru od hran, jak je ve výškové mapě na obr. 83 viditelné nad okrajem podložky.



Obr. 83 Ukázka ideální volby prahu

V posledním kroku zpracování obrazu je použita funkce **Find Circular Edge**, jejíž funkcionality se shoduje s hranovým detektorem, ale s tím rozdílem, že lokální hranové detektory nejsou rovnoběžné, ale jsou umístěny tak, že jeden konec detektoru směřuje do středu kruhu a druhý vně. Každý z lokálních detektorů je v obraze značen pomocí modré barvy a jeho výstupem, prezentujícím místo nalezení hrany, je malé žluté kolečko. Při nastavení detektoru je vhodné zohlednit všechny faktory zmiňované při nastavení v kapitole 6.9.1 a také je nezbytné nastavit vhodný typ hledané hrany, tedy nástupné, protože v opačném případě by algoritmus nacházel kruh lemující díru.

Střed detektoru by měl být umístěn ve středu pozice, kde by měl být komponent, protože tam bude měření dosahovat nejvyšší přesnosti. Pokud podložka bude posunutá, algoritmus ji vyhledá také, ale vypočítaný průměr bude méně přesný.

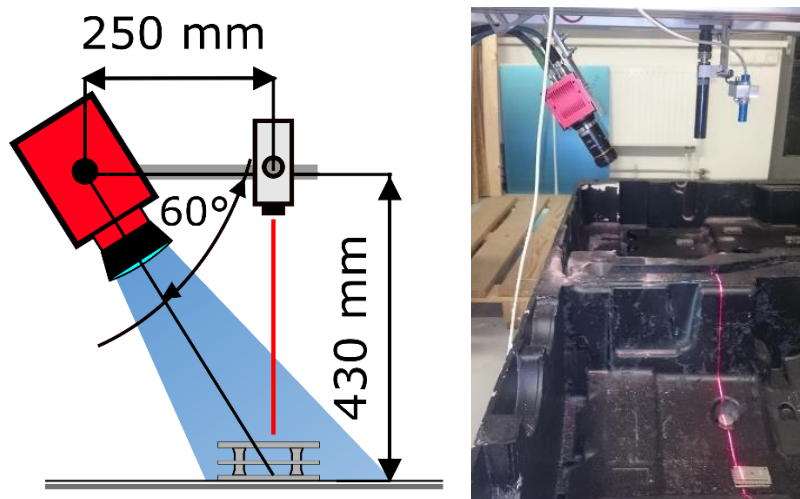


Obr 84 Výsledný zpracovaný obraz s červeně vyznačenou podložkou.



Na obr. 84 je zobrazený finální zpracovaný obraz s vyhledanou válcovitou podložkou, jejíž nalezený obvod je vyznačený červeným kruhem. Dle vypočítaných údajů by měla mít podložka průměr 25,02 mm, což odpovídá skutečnosti.

## 6.13 Měření – Kamera 2



Obr. 85 Nastavení geometrie během měření s kamerou Automation Technology C5

### 6.13.1 Výpočet parametrů

Přestože je kamera Microsoft Lifecam použitelná pro vývojové aplikace, a i při prostorovém skenování obstála, její použití je bohužel limitováno na 10 až 20 profilů za sekundu, což vyjde na každou pozici, která měří zhruba 8 cm, na 12 vteřin. To je pro aplikaci nepřijatelné. Druhá testovaná kamera byla schopná při stejném rozlišení zpracovat a poslat 1400 profilů za sekundu. To odpovídá času 200 ms na jednu pozici v případě pořízení 3 profilů na 1 milimetr.

Hlavní myšlenkou zpočátku bylo, aby kamera zabírala celou část formy pro jeden odlitek, tu při plném rozlišení oskenovala pohybem v jednom směru. Poté se vyhodnotila pouze 1 výšková mapa. Testovací forma měla 2 části, které by byly skenovány zvlášť. Každá z částí je dlouhá 79 cm a v případě že by každá část byla měřena 15 sekund a systém by měl mít po ukončení měření 20s na vyhodnocení výsledků (10s v rezervě pro pohyb robotické paže, hledání koordinační značky apod.) bude při rychlosti pohybu paže 5,4 cm/s nasbíráno 5 profilů na jeden milimetr. Při výpočtu se vycházelo z toho, že kamera může poskytnout při plném rozlišení maximálně 300 profilů za sekundu.

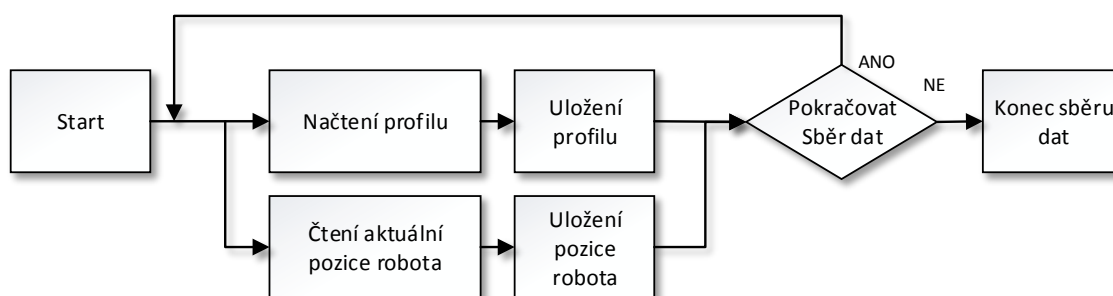
Dále bylo potřebovat vypočítat plošné rozlišení, protože nejmenší možný rozlišitelný detail měl být minimálně 1 mm. Ve výpočtu se vychází, že profil měl být zachycen na délce poloviny formy (část pro jeden odlitek), která měřila 60 cm. A proto se kamera musela umístit alespoň 50 cm daleko od formy, aby svým horizontálním zorným úhlem 64° zachytila celé dno. Po přepočtu byla nejhrubější plocha pokrytá jedním pixelem vypočítána na 0,4 mm (plné využití konfigurace 2048 pixelů na profil), což koresponduje s vzorkovacím teorémem. Pro výpočet byly použity rovnice 1,2 a 3, které jsou uvedeny v teoretické části.

### 6.13.2 Nastavení kamery

Kamera je dodávána s vlastním uživatelským prostředím CX Explorer, které slouží ke konfiguraci kamery, případně její kalibraci. Samotné nastavení ale možno upravit i v prostředí NI MAX, protože kamera podporuje standard GigE Vision.

Čtyři algoritmy pro hledání stopy jsou implementovány v kameře a pro testovací účely byl zvolen algoritmus **MAX**, který se svojí funkcí shoduje s funkcí **MAX\_Center**, jenž je implementován v programu pro první kameru. Důvodem výběru byla odolnost vůči šumu, který byl způsoben odrazivým povrchem podložek.

### 6.13.3 Program pro sběr dat



Obr 86. Algoritmus pro kontinuálním sběr dat z kamery 2.

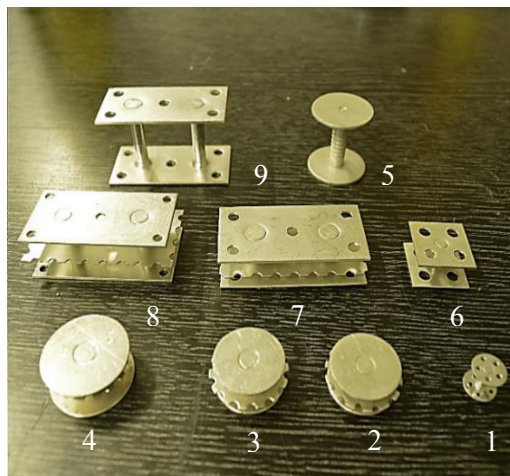
Pro kameru Automation Technology C5 byla vyvinuta jednoduchá aplikace pro sběr dat, která obsahuje stejný komunikační algoritmus pro navázání spojení a pro vyčítání pozice robota s PLC, jako byl popsán v kapitole 6.4. Pokud obsluha zmáčkne tlačítko **GRAB**, aplikace začne ukládat profily takovým způsobem, že se v první fázi čeká, dokud nebudou pořízena nejaktuálnější data jak z kamery, tak z PLC. To proto, aby bylo dosaženo synchronizace. Poté jsou data uložena a čeká se na přijetí dalšího profilu. V případě ukončení aplikace je možné data uložit v neupraveném stavu, aby s nimi bylo možné pracovat později.

V dalším kroku se výšková mapa zpracovala funkcemi, které jsou uvedeny v kapitole 6.11 na obr. 74, ovšem první fáze, kdy se obraz škáluje v rovině laserové linie je vynechána, protože funkce **ScaleXAxis** nemá k dispozici kalibrační vzor. Celé experimentální měření s kamerou 2 bylo provedeno bez škálování této osy, což pro posudek kvality měření a aplikovatelnosti nebylo zapotřebí.

## 7 Testování a vyhodnocení metod

V následující kapitole jsou uvedené praktické testy jednotlivých částí, které byly provedeny za účelem posudku, zdali je možné jednotlivé algoritmy využít tak, aby byl splněn požadavek na rychlost a přesnost systému.

Hlavním předmětem měření byly distanční podložky, které jsou zobrazeny na obr. 83. V jednotlivých částech testu se na podložky odkazuje číslem, které se shoduje s číselným značením podložek na obrázku s přibližnými rozměry v tab. 13. Čtenář zde tedy může nahlédnout v případě, že by rád věděl, jak testovaný předmět vypadal.



*Obr 87. Distanční podložky*

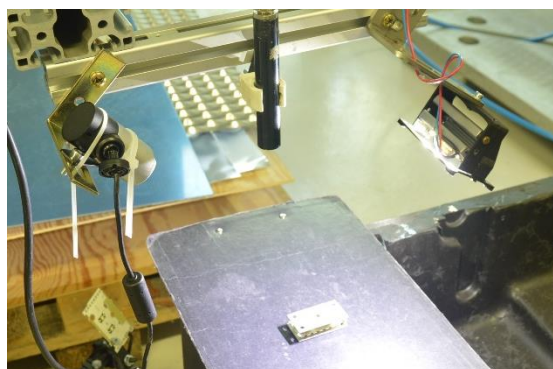
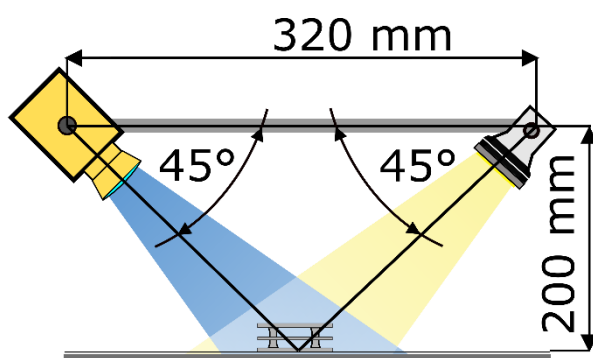
*Tab 13. Rozměry distančních podložek*

Podložky			
Válce	Průměr	Výška	
1	10	8	
2	20	8	
3	20	10	
4	25	10	
5	25	26	
Kvádry	Šířka	Délka	Výška
6	20	20	10
7	25	50	12
8	25	50	16
9	25	50	28

## 7.1 Testování algoritmu pro nalezení podložek pomocí konvenčních metod

V následující části jsou provedeny testy algoritmu pro nalezení distančních prvků, který je popsán v kapitole 6.9. Všechny testy v této podkapitole byly měřeny za stejného nastavení geometrie, se stejným kalibračním vzorem, ve statické poloze robota a komponenty nebyly odměřovány ve formě, ale na rovné podložce. To z toho důvodu, že dno formy je v některých místech nakloněné, což by systematickou chybou zvýšilo naměřenou odchylku.

V následující části jsou odměřeny pouze podložky s tímto označením: 1,2,4,6,7. Všechny podložky nebyly měřeny z toho důvodu, že některé mají stejný rozměr a tvar kontaktní plochy. Daný výběr pokrývá všechny možné tvary.



Obr 88. Nastavení scény pro měření rozměrů distančních prvků

Tab 14. Nastavení kamery a výsledky kalibrace pro měření rozměrů distančních prvků

Mód kamery	35
Rozlišení kamery	1920 x 1080
Ostření	16
Expoziční čas	0,005 s
Rozlišení na pixel	0,27 mm
Maximální chyba způsobená geometrickou distorzí v oblasti zájmu	0,32 mm

Tab 15. Srovnání naměřených a skutečných délek a průměrů kontaktních ploch kvádrů a válců

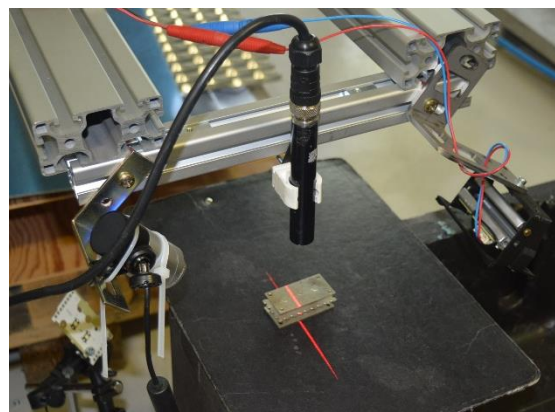
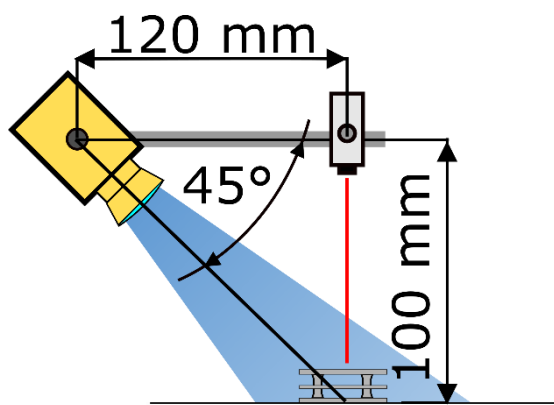
Tvar	Označení	Strana	Skutečný průměr nebo délka [mm]	Minimální naměřená hodnota [mm]	Maximální naměřená hodnota [mm]	Maximální odchylka [mm]
Válce	1		10	9,38	10,6	0,6
	2		20,1	20,74	20,78	0,26
	4		25	25,18	25,34	0,34
Kvádry	6	1	20,05	20,03	20,07	0,02
		2	20	20,15	20,23	0,23
		3	20,05	20,33	20,36	0,31
		4	20	19,87	20,03	0,13
	7	1	25	24,55	24,66	0,45
		2	50	50,19	50,31	0,31
		3	25	24,74	24,86	0,26
		4	50	50,46	50,6	0,6

Tabulka č.15 ukazuje rozměry změřené kamerou a skutečné rozměry, které byly změřeny pomocí posuvného měřidla. Rozptýly hodnot, které jsou uvedené v tabulce, značí minimum a maximum naměřených rozměrů a byly vyhodnoceny ze 100 měření.

Z tabulky naměřených odchylek lze usoudit, že při daném nastavení měří systém rozměry kontaktních ploch s dostatečnou přesností, protože největší naměřená odchylka vykazovala 0,6 mm chybu vůči skutečným rozměrům podložek.

## 7.2 Testování algoritmu pro určení výšky podložek pomocí aktivní triangulační metody.

V následující části jsou provedeny testy algoritmu pro určení výšky distančních prvků, který je popsán v kapitole 6.10. Všechny testy v této podkapitole byly měřeny za stejného nastavení geometrie, se stejným kalibračním vzorem, ve statické poloze robota a komponenty nebyly odměřovány ve formě ale na rovné podložce. To z toho důvodu, že dno formy je v místech kde se vkládají podložky snižené a nebylo by z nich možné přesně stanovit odchylku měření.



Obr 89. Nastavení scény pro měření výšky distančních prvků

Tab 16. Nastavení kamery a kalibrace pro měření výšky distančních prvků

Mód kamery	35
Rozlišení kamery	1920 x 1080
Ostření	12
Expoziční čas	0,0002 s
Rozlišení na pixel	0,16 mm
Maximální chyba způsobená geometrickou distorzí v oblasti zájmu	0,15 mm

Tab 17. Srovnání naměřených a skutečných výšek obou typů podložek

Tvar	Označení	Skutečná výška [mm]	Minimální naměřená výška [mm]	Maximální naměřená výška [mm]	Maximální odchylka [mm]
Válce	1	7,9	7,94	8,14	0,6
	3	10	10,14	10,3	0,26
	5	26	26,13	26,29	0,34
Kvádry	6	10	9,91	10	0,09
	7	12	12,21	12,3	0,3
	8	15,8	16,06	16,17	0,37
	9	27,7	28	28,05	0,35

Tabulka č.17 ukazuje výšku podložky, která byla změřena kamerou a skutečnou výšku podložky, která byla změřena pomocí posuvného měřidla. Rozptyl hodnot, uvedených v tabulce, značí minimum a maximum naměřených rozměrů a byl vyhodnocen ze 100 opakovaných měření.

Z naměřených výsledků lze usoudit, že maximální odchylka 0,6 mm tvořila výjimku, a že přesnost měření výšky se při daném nastavení pohybuje kolem 0,3 mm, což je v aplikaci dostatečné, protože nejmenší možný rozlišitelný detail měl být maximálně 1 mm.



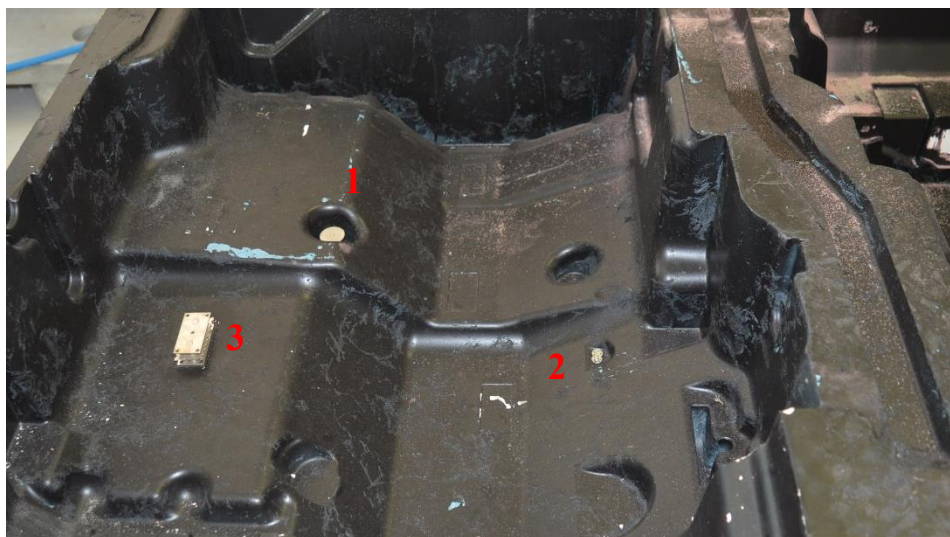
### 7.3 Testování algoritmu pro nalezení podložky ve výškové mapě

Při zpracování jednotlivých profilů s nastavením o největším dostupném rozlišení může výpočetní doba jednoho profilu trvat i sekundu, což je moc dlouhý interval pro aplikovatelné kontinuální měření. Proto byl použit takový mód a taková kalibrace, které zaručovali přijatelnou snímací frekvenci 10 Hz. Geometrie soustavy byla identická jako v případě algoritmu pro určení výšky podložek pomocí aktivní triangulační metody.

Tab 18. Nastavení kamery pro měření výškové mapy

<b>Mód kamery</b>	25
<b>Rozlišení kamery</b>	800 x 600
<b>Ostření</b>	16
<b>Expoziční čas</b>	0,0002 s
<b>Rozlišení na pixel</b>	0,29 mm
<b>Maximální chyba způsobená geometrickou distorzí v oblasti zájmu</b>	0,26 mm




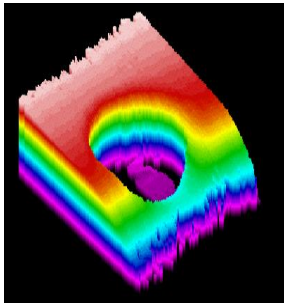
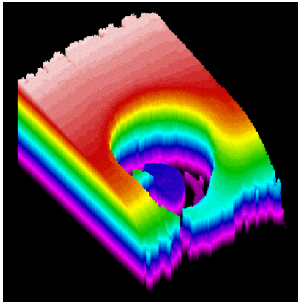
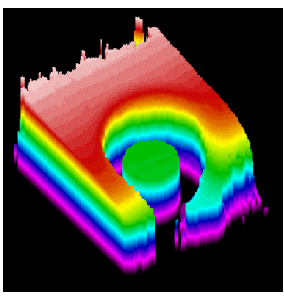
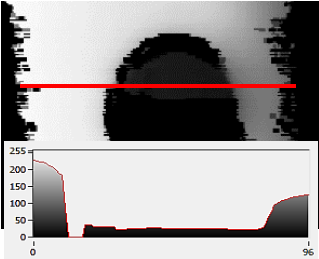
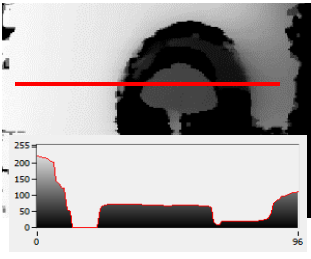
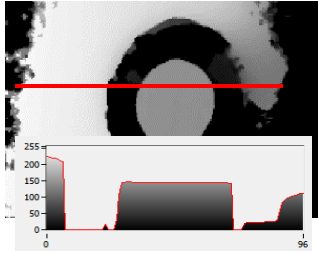
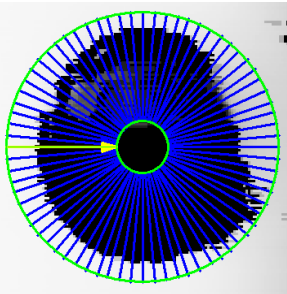
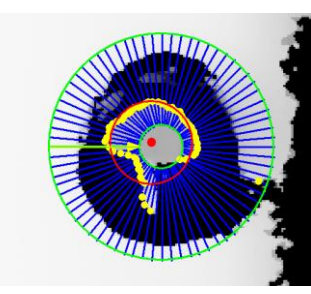
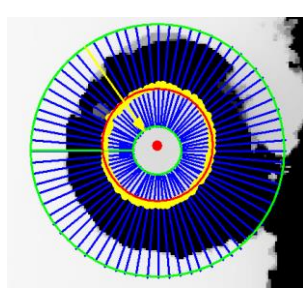
Na obrázku 90 jsou označeny ty pozice, na kterých proběhl test měření výškové mapy. Tyto místa prezentují všechny ty části formy, ve kterých by se mohla distanční podložka vyskytovat a které mají unikátní tvar. Jednotlivé výškové mapy jsou po jejich pořízení škálovány na 0,5 mm v obou osách.



Obr. 90 Zvýrazněné části formy, ve kterých proběhlo měření výškové mapy

V následujících tabulkách jsou na třetím řádku uvedené i jednotlivé profily, podle kterých by šla vypočítat výška podložek podobně, jak tomu bylo v kapitole 6.10. Jednotlivé mapy ovšem byly uloženy v 8. bitovém formátu, který sice neprezentuje reálné hodnoty, ale je kompatibilní pro prostředí Vision Assistant2017, jenž bylo pro další zpracování použito.




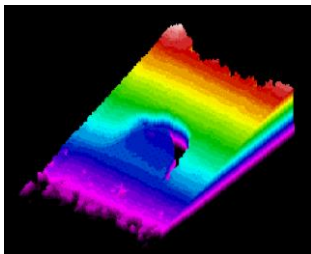
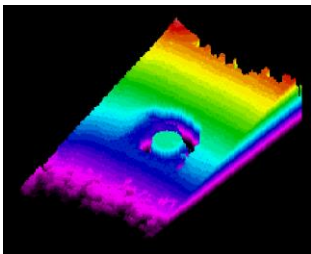
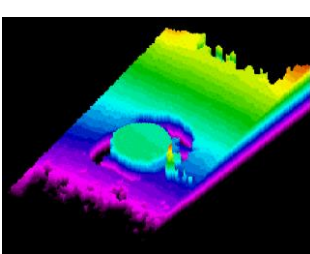
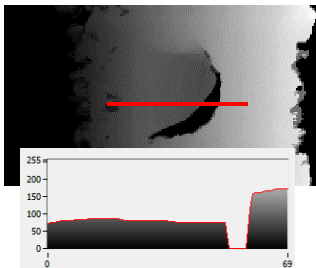
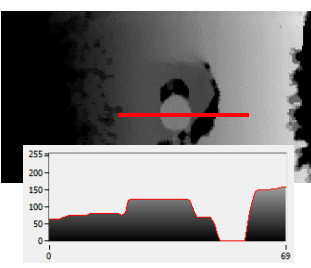
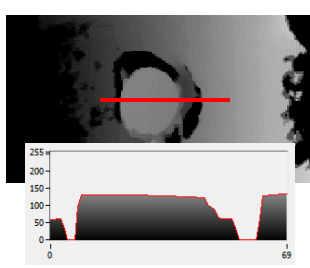
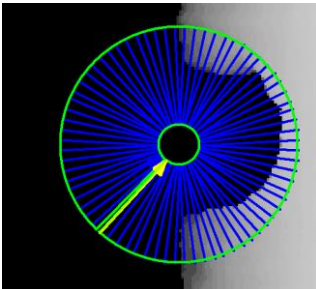
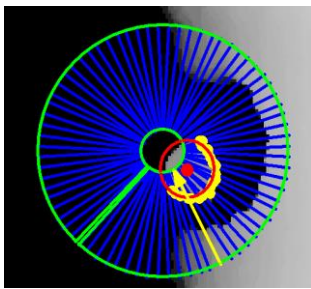
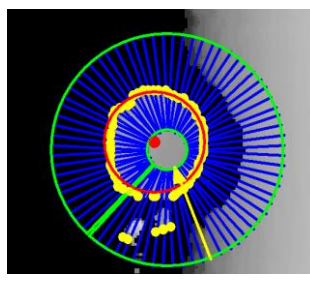
Tab 19. Výsledky měření z první uvedené pozice formy.

	Bez podložky	Podložka č. 2	Podložka č. 5
Fotografie			
Prostorový model skenované scény			
Určení výšky podložky dle profilu			
Určení průměru hranovým detektorem			

Na posledním řádku je zobrazený způsob měření průměru, kde je viditelné, že algoritmus našel kružnice jen skutečně tam, kde podložky byly. V případě podložky č.2 byl naměřen průměr 23,48, jehož odchylka činí 1,52 mm. To je nepřijatelné. Chyba by se dala zmenšit využitím jiného nastavení geometrie, kde by laser nebyl zastíněn hranou díry a podložku by mapoval přesněji. Co se týče podložky č.5, ta byla změřena na 25,3 mm s 0,3 mm odchylkou.




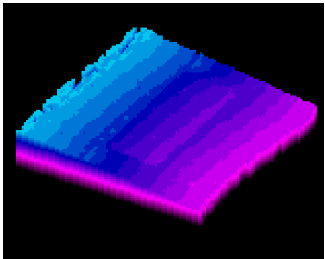
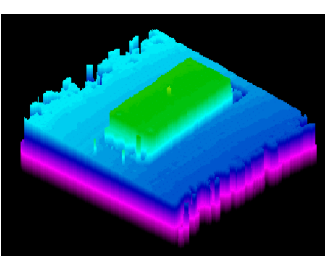
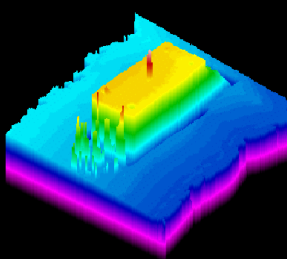
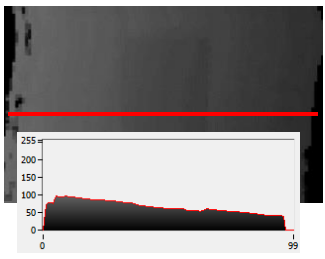
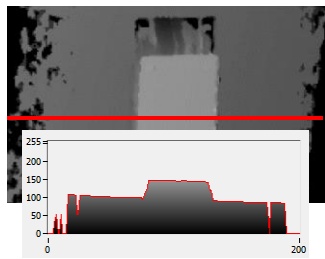
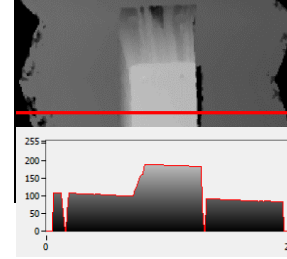

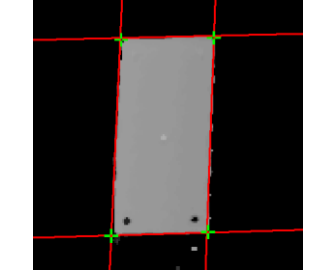
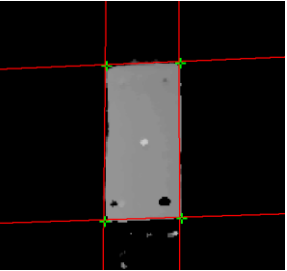


Tab 20. Výsledky měření z druhé uvedené pozice formy.

	Bez podložky	Podložka č. 1	Podložka č. 3
Fotografie			
Prostorový model skenované scény			
Určení výšky podložky dle profilu			
Určení průměru hranovým detektorem			

Na posledním řádku je tabulky je znázorněn algoritmus pro nalezení kontaktní plochy válcovitých podložek a lze si všimnout, že podložky byly nalezeny skutečně tam, kde se nacházely. Průměr podložky č. 1 byl změřen na 10,28 mm s odchylkou 0,28 mm. Průměr Podložky č. 3 měřil 20,04 mm a jeho odchylka tvořila pouze 0,04 mm.

Tab 21. Výsledky měření z třetí uvedené pozice formy.

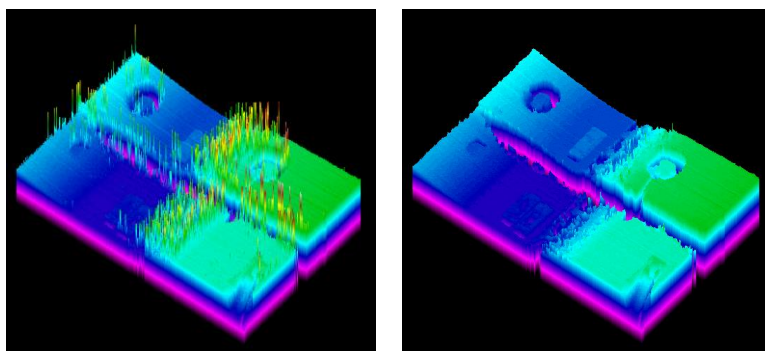
	Bez podložky	Podložka č. 8	Podložka č. 9
Fotografie			
Prostorový model skenované scény			
Určení výšky podložky dle profilu			
Určení délky stran hranovým detektorem			

Na posledním řádku, je znázorněn výpočet jednotlivých stran podložek pomocí algoritmu, který je identický s tím, který byl použit v kapitole 6.9. Z měření jednotlivé strany podložky č.8 vycházely na 50,46; 50, 63; 24,1 a 24,4 mm s nejvyšší naměřenou odchylkou 0,9 mm. Pro podložku č. 9 to pak bylo 51,93; 52,07;25,9 a 24,3 mm s nejvyšší naměřenou odchylkou 1,07 mm. Dá se tedy usoudit, že při aktuálním nastavení pro měření délky hran byl méně přesný než ten, který měřil rozměry pomocí konvenční metody.

## 7.4 Testy – kamera 2

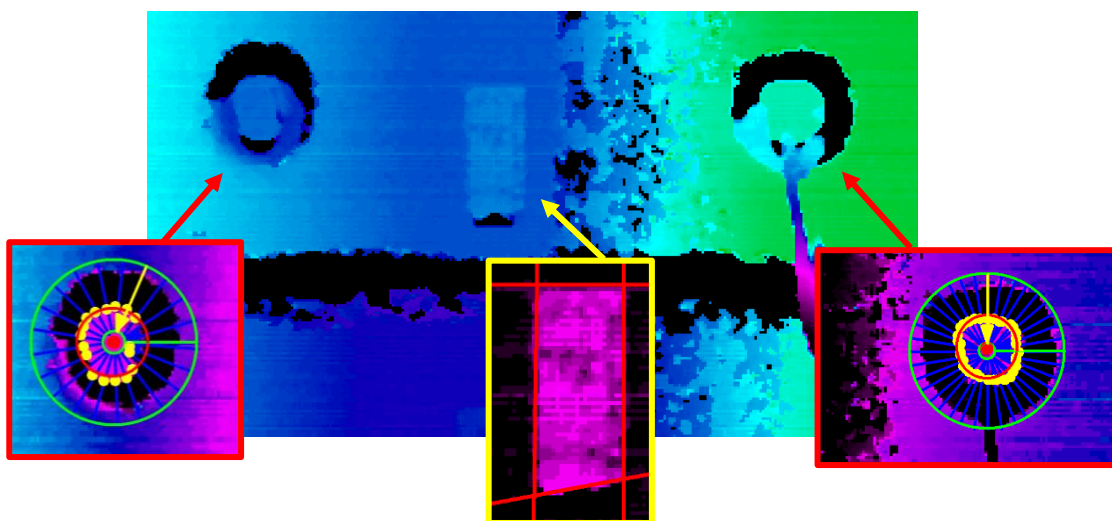
Dále uvedené výškové mapy byly pořízeny kamerou Automation Technology C5.

Většina snímků obsahovala poměrně velké množství vysokofrekvenčního šumu, který byl způsoben okluzí na hranách a nakloněných rovinách formy. Takže při předzpracování byla nutná filtrace obrazu.



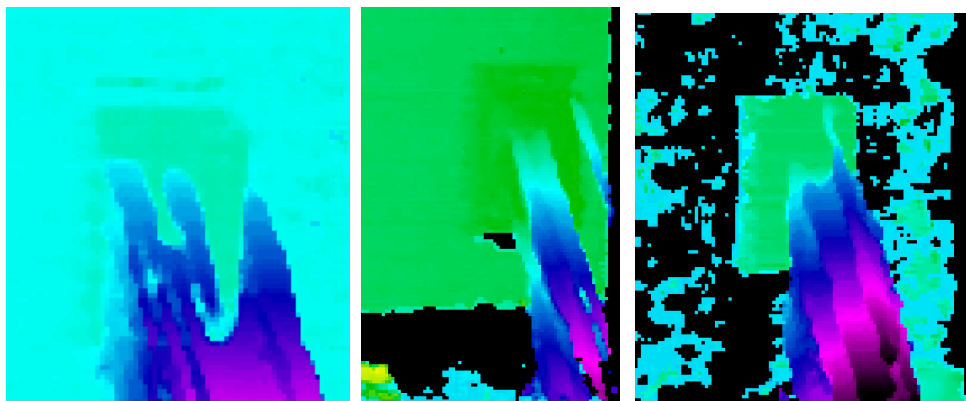
*Obr. 91 Ukázka filtrace výškové mapy pomocí filtru o velikosti 4x4*

I při nastavení uvedeném v kapitole 6.13.1 bylo dokázáno, že navržené algoritmy pro hledání jednotlivých prvků aplikovatelné jsou. Bohužel měření proběhlo pouze krátkodobě, tak nelze určit, jestli by byl systém spolehlivý v nepřetržitém provozu.



*Obr. 92 Ukázka zpracování výškové mapy*

Jediný problém, který ve finálním úsudku dělal tuto metodu nepoužitelnou bylo, že lesklý a odrazivý povrch podložek, které byly umístěny na krajích zorného pole, odrážel dostatečné množství světla na čip kamery i když přímo laserem nasvícen nebyl. To způsobilo silné zkreslení pod hranami součástí ve směru ke kameře. Tento nežádoucí jev se nepodařilo potlačit. Možným řešením by bylo použití objektivu s menším zorným úhlem, ale v tom případě by se musela být kamera umístěna výše nad formou.



*Obr. 93 Zkreslení u hran podložek*

## 7.5 Testování časové náročnosti jednotlivých algoritmů

V této podkapitole jsou uvedeny tabulky, znázorňující dobu zpracování algoritmů. Tento údaj je pouze relativní. Čas zpracování je ovlivněn i operačním systémem, který může při přepínání procesů na pozadí udělovat aplikaci rozdílné časové intervaly. Takže ve výsledku se každá z iterací programů mírně liší a uveden je průměrný čas.

Tab 22. Test doby kalibrace pro různé rozlišení kamer

Rozlišení kamery	Doba kalibrace [s]
160 x 120	0,004
320 x 240	0,015
640 x 480	0,04
800 x 600	0,08
1280 x 720	0,2
1920 x 1080	0,4

Tab 23. Doba zpracování algoritmů pro různé rozlišení oblasti zájmu.

Rozlišení oblasti zájmu	Doba zpracování algoritmu [s]						
	Rect_edge	Circle	Max_C	Max_Up	Max_Down	COG	Object_height
200 x 200	0,006	0,002	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
500 x 500	0,04	0,01	0,006	0,006	0,006	0,04	0,02
700 x 700	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,03
1000 x 1000	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,15	0,05
2000x 1000	0,25	0,08	0,04	0,04	0,04	0,3	0,08

Z porovnání tabulek je zřetelné, že na rychlosti zpracování snímku má podstatně větší vliv kalibrace než inspekční algoritmy, proto je pro optimalizaci vhodnější zvolit menší rozlišení kamery s větší oblastí zájmu, než mód s velkým rozlišením a zaměřovat se pouze na malou oblast zorného pole. Také je vhodné se kalibrační sekvenci vyhnout úplně v případě že není nutná.

Dalším zajímavým faktem je, že algoritmy do rozlišení 640x480 nezpožďovali chod programu a v případě použití kamery s větší snímkovací frekvencí by bylo možné pořídit i více jak 30 profilů za sekundu. Teoreticky až 100 profilů za sekundu v případě nejnižšího rozlišení.

## 8 Závěr

V rámci diplomové práce se podařilo realizovat jak hardwarovou, tak softwarovou část pro úvodní testování realizovatelnosti projektů stavěných na strojovém vidění a s ním spjaté triangulační metodě. A to i s předpokladem, že systém může kooperovat s robotickým manipulátorem. Takže výstupem práce není jenom návrh funkčního řešení pro jeden projekt, ale aplikace, která může být užitečná pro rychlý vývoj dalšího.

V první fázi jsem navrhnul část aplikace, která se věnuje konvenčnímu způsobu zpracování obrazu. Tedy extrakci dat z jednoho snímku. Zde se mi podařilo navrhnout algoritmus, který v řešené úloze s dostatečnou přesností změří rozměry kontaktních ploch distančních prvků. Výhodou algoritmu bylo, že celý proces měření proběhl během jedné iterace, což se podle nastavení parametrů kamery a kalibrace pohybovalo mezi 0,01 – 1s. Nevýhodou přístupu je omezené použití pouze na kontrastní měřenou scénu a na velkém vlivu parazitního osvětlení, protože i když jsem byl schopný LED panelem přesvítit okolní denní světlo, při náhlém intenzivním osvětlení pracoviště jsem parametry detekce musel přenastavit. Takže systém by byl určitě použitelný, ale jeho determinismus by měl být zajištěn zakrytáváním pracoviště. Další nevýhodou v případě algoritmu pro nalezení kvádrovitých podložek, je omezený úhel natočení. V případě natáčení podložky k úhlu 45° jsou hranové detektory “zmatené“, protože mohou nalézt 2 hrany které odpovídají předvoleným parametrům. Problém by se dal vyřešit případným otáčením ramene robota nebo softwarovým otáčením snímku, ale jedná se o další komplikaci.

V druhé fázi jsem navrhnul algoritmus, pro měření výšky pomocí triangulační metody, jehož výhodou je imunita vůči intenzivnímu, parazitnímu osvětlení (v případě použití výkonného laseru) a společně s dosažitelnou vysokou přesností měření jsou důvodem pro další výzkum a vývoj v dané oblasti. Kromě dobrých výsledků při měření výšky podložek byl algoritmus aplikovatelný i pro zjištění přítomnosti ucpávek jader a filtrů. U těch je výhodou, že kopírují tvar místa, do kterého jsou vloženy, takže se nemusí řešit jejich pozice, ale pouze přítomnost. Nejslabším článkem softwarové části byla v tomto přístupu kalibrace, která sice zaručovala dostatečnou přesnost v dané úloze, ovšem vývojáři průmyslových kamer kalibraci řeší pomocí jiných metod, které při stejném rozlišení kamery umožní přesnější rozlišení výšky předmětu.

Při návrhu 3D skeneru se negativně projevila nízká snímkovací frekvence kamery, která limitovala rychlost pořízení výškové mapy. Ovšem i v případě použití kamery s vyšší snímkovací rychlostí bude frekvence značně omezená, kvůli době trvání kalibrace. Proto bych rád v dalším kroku aplikaci přestavil tak, aby během měření kalibraci neaplikovala na každý snímek, ale aby byl přepočítán až po konci sběru profilů, čímž by se snímkovací frekvence mohla teoreticky 50x zvýšit. V každém případě i tak by ani rychlost ani přesnost nemohli konkurovat druhé testované kameře, která se ovšem cenově pohybuje v jiných třídách.

Pro kontrolu formy by se v případě nevelkých nároků zákazníka navržený systém použít dal, ale jenom v tom případě, že by rameno jezdilo s kamerou na jednotlivé pozice, kde by se prováděla inspekce pomocí kombinace algoritmů pro určení výšky a rozměrů podložek. V případě vyšších nároků na přesnost měření a možnosti intuitivní vizuální kontroly by bylo vhodnější využít druhou testovanou kameru.

## Literatura

1. ULRICH, Markus, Carsten STEGER a Christian WIEDEMANN. Machine Vision Algorithms and Applications. 2nd. Wiley: John Wiley, 2017. ISBN 3527413650.
2. HOTAŘ, Vlastimil. [i]Úvod do problematiky strojového vidění, část 1: Základní principy a hardware.[i] Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. 10 s. ISBN 978-8074941566.
3. CIURCZAK, Emil W.. Near-infrared applications in biotechnology. New York : Marcel Dekker, 2001. 366 s. ISBN 0-8247-0009-0.
4. *Encyklopedie fyziky: Záření absolutně černého tělesa* [online]. [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: [http://fyzika.jreichl.com/data/Mikro\\_2kvantovka\\_soubory/image004.jpg](http://fyzika.jreichl.com/data/Mikro_2kvantovka_soubory/image004.jpg)
5. ŠEVČÍK, Jiří. Tzbinfo: *Princip činnosti, typy a komunikační rozhraní IP kamer* [online]. 21-10-2013 [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/10480-princip-cinnosti-typy-a-komunikacni-rozhrani-ip-kamer>
6. *3D scanner* [online], poslední aktualizace 28. listopadu 2017 15:10 [cit. 2017-12-06], Wikipedie. Dostupné z WWW: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner)
7. ČERMÁK, Jan. *Metody 3D skenování objektu*. VUT Brno, 2015. s15. Bakalářská práce. Vedoucí práce ING. TOMÁŠ MARADA, PH.D.
8. URBANEK, Aleš. *KONTROLA SOUČÁSTÍ POMOCÍ METOD REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ*. Brno, 2008. Bakalářska práce. VUT v Brně Fakulta Strojního Inženýrství.
9. RAMONTH, Parisa a Jun SEKIGUCHI. *Calibration and accuracy analysis for a laser triangulation system*. Mälardalen, 2011. Diplomová práce. Mälardalen University. Vedoucí práce Antonios Fokas, Kimmy Långström.
10. *Leonardo technology: Bezpečnost laseru Třídy 1 až 4* [online]. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>
11. *Fotoroman: OSTŘENÍ A HLOUBKA OSTROSTI - 1. ZAOŠŤOVÁNÍ* [online]. 2013 [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.fotoroman.cz/tech2/focus1.htm>
12. *Wikipedia: Visible spectrum* [online]. 03.04.2018 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Visible\\_spectrum#cite\\_note-17](https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum#cite_note-17)
13. *Edmund optics* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.eu/resources/application-notes/imaging/camera-types-and-interfaces-for-machine-vision-applications/>



14. *ABB: Detailed information for: IRB 4600* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/3HAC020536-017/irb-4600>
15. *BR automation: X20 System* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/control-systems/x20-system/>
16. *MOVIMED: C5 Series* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.movimed.com/products/3d-cameras/c5-series/>
17. *PC WORLD: Microsoft LifeCam Studio review: A hi-def webcam for business or pleasure* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.pcworld.com/article/3125666/consumer-electronics/microsoft-lifecam-studio-review-a-hi-def-webcam-for-business-or-pleasure.html>
18. *NOTEBOOK CHECK: Acer TravelMate 5760G-2416G64Mnsk* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.notebookcheck.net/Acer-TravelMate-5760G-2416G64Mnsk.54969.0.html>
19. *Forum arduino: Arduino NANO Pinout Diagram* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=147582.0>
20. *Wikipedia: Pulse-width modulation* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation)
21. *LUMILEDS: LUXEON F ES datasheet* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.lumileds.com/uploads/622/DS169-pdf>
22. *ROOT.CZ* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/arduino-jak-pro-nej-zacit-programovat/>



## **Seznam příloh:**

<b>Příloha I.</b>	Schéma zapojení a návrh plošného spoje pro výkonového přepínač	<b>3 strany</b>
<b>Příloha II.</b>	Návrh plastového krytu pro výkonový přepínač a omezovač	<b>1 strana</b>
<b>Příloha III.</b>	Návrh rámu LED panelu	<b>1 strana</b>

### **Příloha na CD**

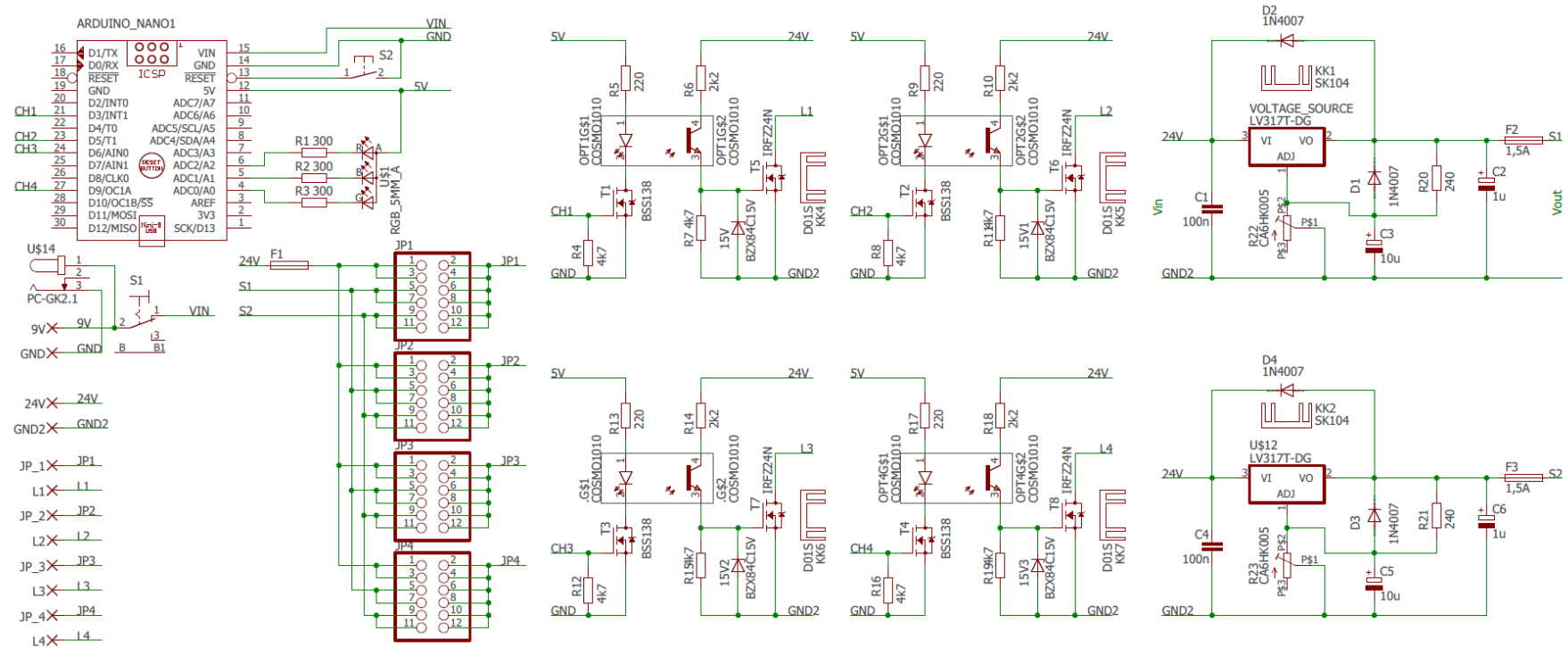
Složky:

Aplikace LabVIEW – obsahuje kódy a konfigurační soubory pro LabVIEW

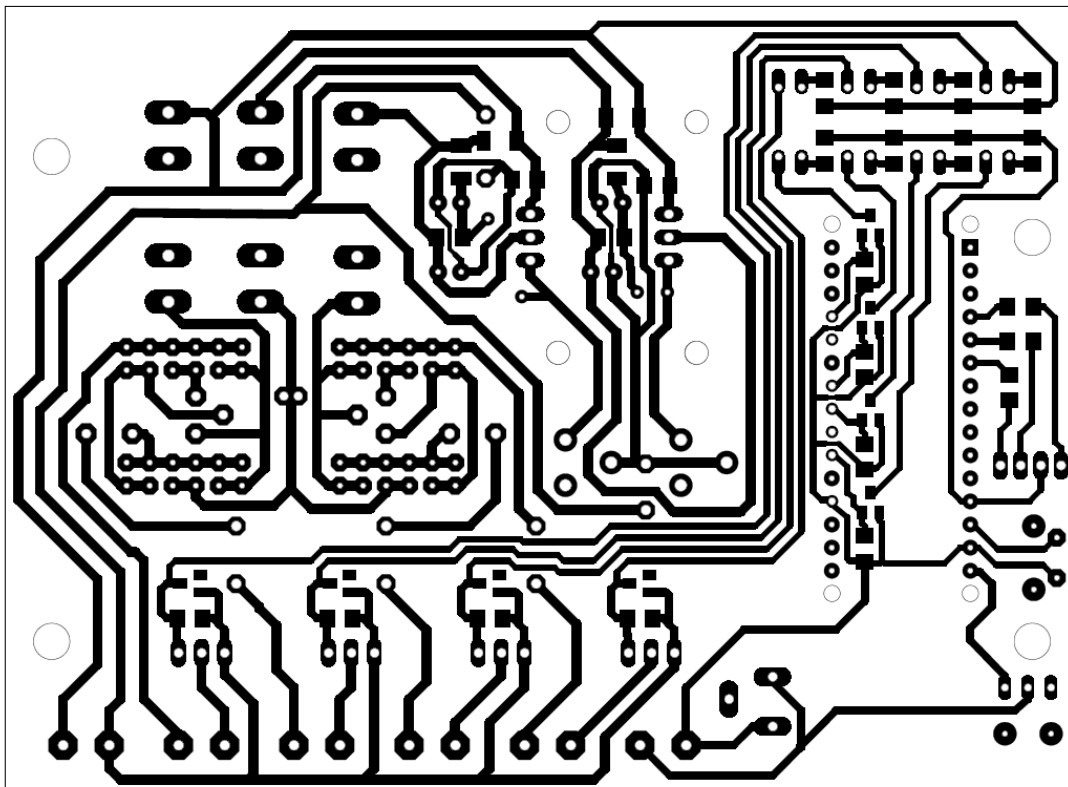
Omezovač výkonu – Obsahuje návrh plošného spoje, kód pro Arduino a 3D modely pro tisk

## Příloha I. Schéma zapojení a návrh plošného spoje pro výkonového přepínač

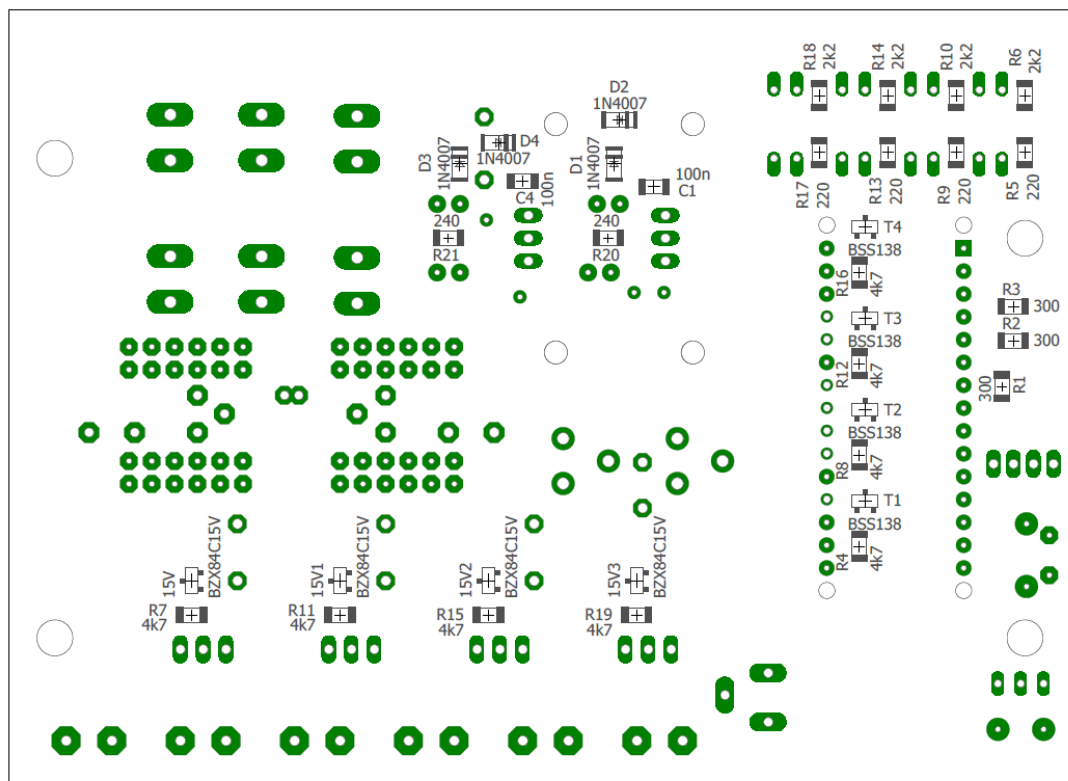
Schéma zapojení výkonového přepínače a omezovače



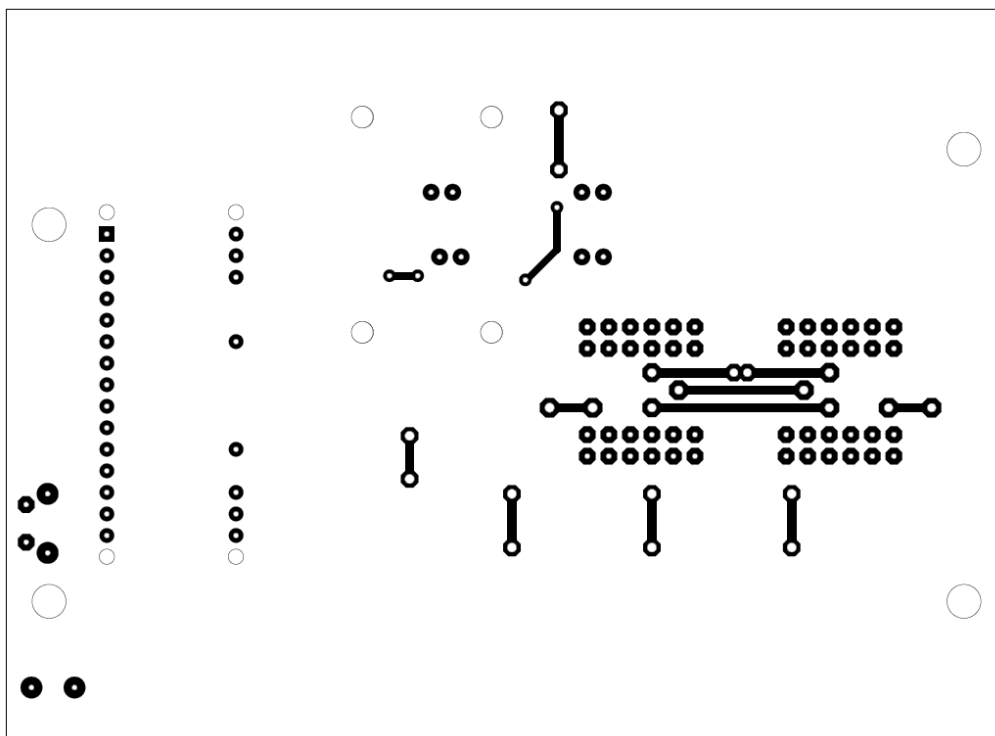
Předloha pro výrobu DPS – spodní strana (zrcadlově):



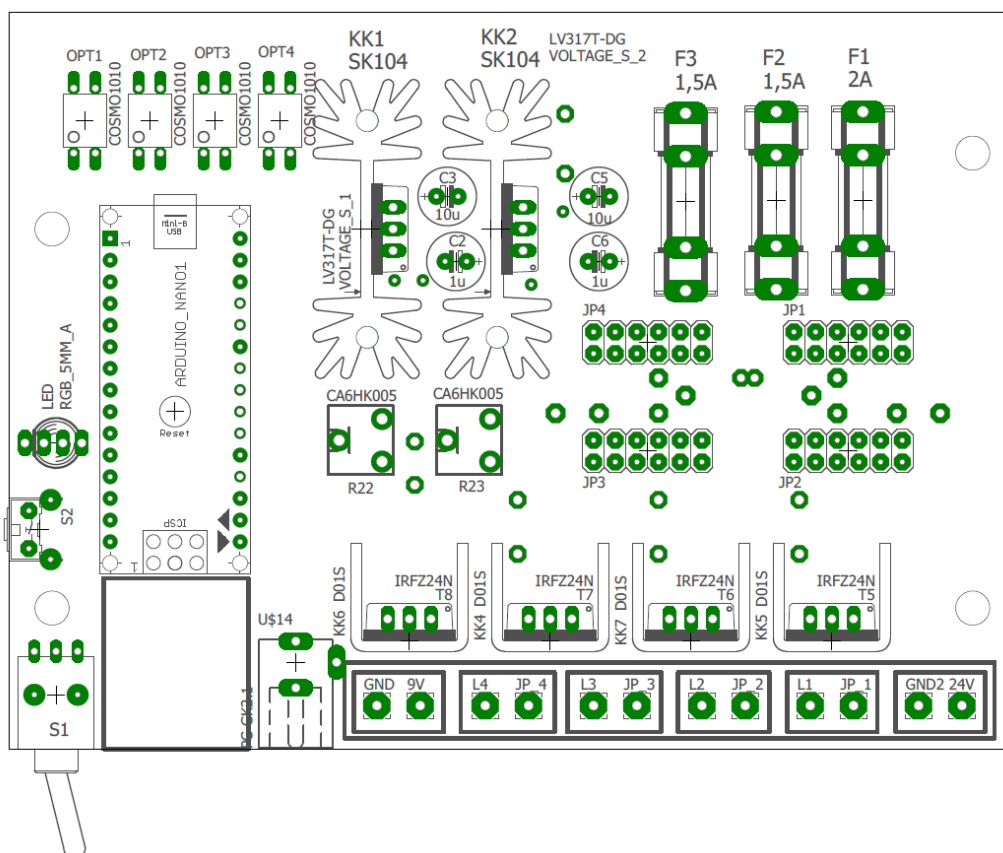
Předloha pro osazení DPS – spodní strana (zrcadlově):



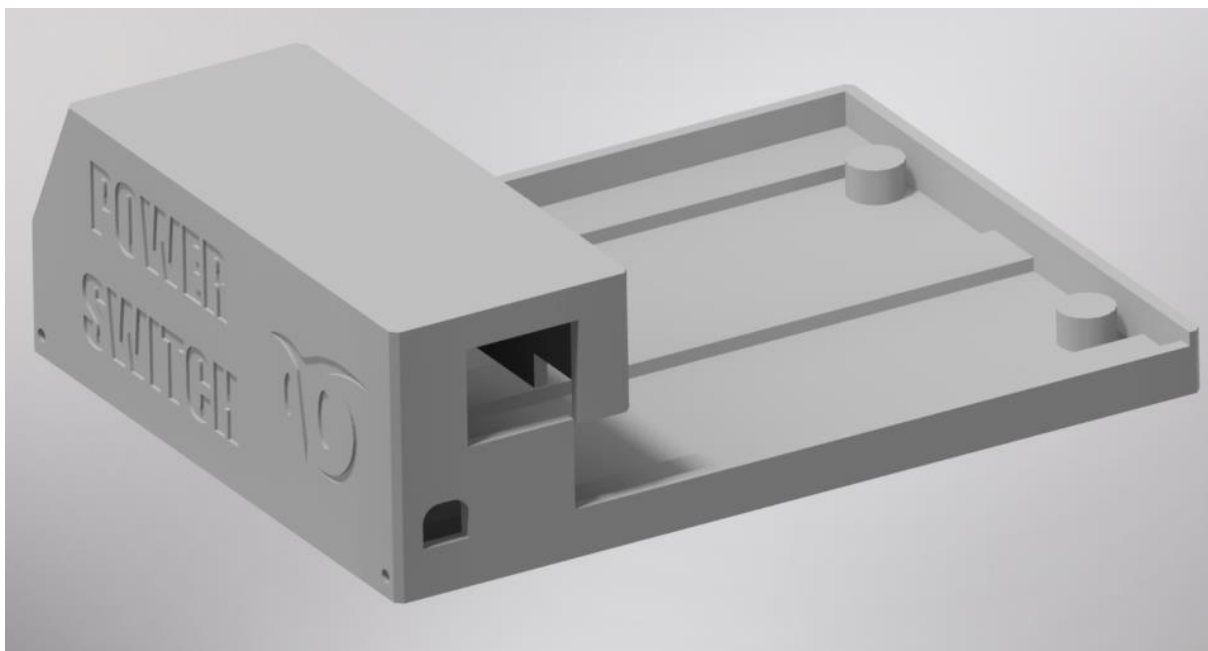
Předloha pro výrobu DPS – horní strana:



Předloha pro osazení DPS – horní strana:



**Příloha II. Návrh plastového krytu pro výkonový přepínač a omezovač**



## **Příloha II. Návrh rámu LED panelu**

